تعیین خصوصیات جریان و زیرفشار در پی‌های لایه‌دار سدهای نفوذناپذیر با استفاده از نمودارهای بی‌بعد

فرزانه صیادزاده[1*] و سیدمحمدعلی زمردیان[2]

۱*- نویسنده مسئول، دانشگاه آزاد اسلامی مراغه، مراغه، ایران. Sayadzadeh_f@jaumaragheh.ac.ir

۲- استادیار گروه آب دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز. mzomorof@shiraz.uc.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۶/۱ تاریخ پذیرش: ۹۰/۲/۱۴

چکیده

مطالعات اخیر در مورد علل خرابی سدها نشان می‌دهد که دلیل اصلی اکثر خرابی‌ها، نامناسب بودن شرایط پی و سنگ بستر است. تراوش، فشار بالابر و پدیده زیرشویی پی، موجب شکستهای فاجعه‌آمیز در سدها گردیده که گرادیان خروجی مهمترین معیار برای کنترل پایداری در مقابل این پدیده است. بنابراین یافتن روشهایی برای کاهش مقدار نشت، گرادیان خروجی و مطالعات کافی برای مقادیر زیرفشار حائز اهمیت خواهند بود. در این تحقیق از نرم افزار انسیس جهت تحلیل جریان آب از پی سد استفاده شده است. خصوصیات جریان (مقدار نشت و گرادیان خروجی) و مقادیر زیرفشار در سدهای نفوذناپذیر با عرض متغیر و پرده‌سپر در عمقهای مختلف پنجه پایین‌دست بررسی گردیده و نتایج بصورت نمودارهای بی‌بعدی ارائه می‌شوند که به طراح این امکان را می‌دهد که مشکلات نشت را پیش‌بینی و با صرف کمترین زمان، طراحی اپتیمم را انجام دهد.

کلید واژه : *نشت، انسیس، زیرشویی، پرده‌سپر، فشار بالابر.*

مقدمه

سدها سازه‌های عظیم و پیچیده‌ای هستند که بارهای بزرگ و متنوعی را بر بستر سنگی خود وارد می‌کنند. پیچیدگی‌های طراحی آنها در مقایسه با سایر سازه‌های سنگین، از آنجا نشأت می‌گیرد که محیط اطراف یک سد را آب فرا گرفته و پی آن در تماس مستقیم با آب قرار دارد. با کاهش نفوذپذیری توده سنگ در پی سد و در نتیجه کاهش حضور آب در حفره‌ها و ناپیوستگی‌های پی، فشار بالابر ایجاد شده در پی نیز کاهش و ضریب اطمینان در مقابل لغزش افزایش می‌یابد. بنابراین آگاهی از مقادیر فشار بالابرنده و افت بار هیدرولیکی در سدها بسیار حائز اهمیت خواهد بود(سروش و فهیمی‌فر،۱۳۸۴).

بطور کلی گرادیان‌های فشار بالا و سرعتهای زیاد تراوش می‌توانند باعث فرسایش بخش‌های کم‌مقاومت و ناپیوستگی‌ها در سنگها شده که به مرور نرخ تراوش افزایش و پایداری سد به خطر می‌افتد (رسولی و شمسائی،۱۳۸۴). بنابراین در نظر گرفتن گزینه‌هایی برای کاهش فشار و کاهش دبی نشت و گرادیان خروجی، مهمترین وظیفه در تحلیل پی سدهای نفوذناپذیر می‌باشد (بیرامی و قربانیان، ۱۳۸۲؛ خالقی و همکاران،۱۳۸۴). خوسلا[1] و همکاران در زمینه حرکت آب در خاک و شبکه جریان مطالعات وسیعی را آغاز نمودند، پرازیل[2] برای اولین بار یک تکنیک ترسیمی برای ساختن شبکه جریان پیشنهاد کرد و فورشهایمر[3] این تکنیک را رسماً بسط داد، روشهایی تحلیلی نیز برای محاسبه خصوصیات نشت و زیرفشار بر اساس شبکه جریان بدست آمده‌اند که شبکه حاصله از آنها در تخمین نشت بکار می‌روند (کیوسیس و پانوس[4]، ۲۰۰۲؛ عبدالرحمان و ماردینی[5]،۲۰۱۰).

در نتیجه پیچیدگی معادلات، توجه به راه‌حلهای تقریبی جلب شد. پاولووسکی یک روش تحلیلی تقریبی به نام روش اجزاء، تهیه کرد که برای حل هر نوع سیستم جریان تحت فشار با عمق متناهی کاربرد داشت، فرض اساسی پاولووسکی در روش اجزاء این است که خطوط هم‌پتانسیل در قسمتهای مختلف بحرانی ناحیه جریان را می‌توان به وسیله خطوط عمودی راست تقریب زد (هار،۱۹۶۲).

پولوبارینوا-کوچینا با استفاده از روش اجزاء روشی تقریبی ارائه داد که به موجب آن خصوصیات نشت ساختارهایی را که در پی‌های لایه‌دار احداث شده است، می‌توان به سادگی و با درجه

1. Khosla et al.

2. Prasil
3. Forchheimer
4. Kiousis and Panos
5. Harr

اعتماد نسبتاً زیاد بدست آورد و پارامتر بی‌بعد ε را معرفی کرد(هار،۱۹۶۲):

$$\varepsilon = \frac{1}{\pi}\tan^{-1}\sqrt{\frac{K_2}{K_1}} \qquad (۱)$$

K_1 و K_2 ضرایب نفوذپذیری لایه‌های بالایی و پایینی خاک دو-لایه که بترتیب دارای ضخامت‌های d_1 و d_2 می‌باشند (فنگ و وو[1]،۲۰۰۶).

زمانی که نسبت K_2 به K_1 از صفر تا بینهایت تغییر می‌کند، مقدار ε از صفر تا 0.5 تغییر خواهد کرد. پولوبارینوا-کوچینا منحنی‌های بی‌بعدی برای تعیین دبی نشت و گرادیان خروجی در مقادیر مختلف ε ارائه داد و شرایط جریان برای سه مقدار ε=0، ε=0.25 و ε=0.5 را بصورت زیر بیان کرد:

۱- ε=0 که معادل قرار گرفتن پایه ناتراوا در عمق d است. در این حالت $K_2=0$ خواهد شد یا سیستم بصورت خاک یک‌لایه با ضخامت d_1 و ضریب هیدرولیکی K_1 خواهد بود که روی یک لایه نفوذناپذیر قرار گرفته است.

۲- ε=0.25 که معادل $K_1=K_2$ است و سیستم بصورت خاک یک لایه با ضخامت d_1+d_2 و با ضریب هیدرولیکی $K_1=K_2$ خواهد بود که روی یک لایه نفوذناپذیر قرار گرفته است.

۳- ε=0.5 که K_2 برابر با بینهایت خواهد بود و سیستم بصورت خاک یک‌لایه با ضخامت d_1 و ضریب هیدرولیکی K_1 خواهد بود و دبی بینهایت خواهد شد (فنگ و وو، ۲۰۰۶). توسعه روشهای عددی و همزمان با آن توسعه رایانه‌ها، استفاده از مدلهای عددی حل معادلات تراوش را میسرنمود. با بکاربردن مدلهای عددی و روش المان محدود، دبی نشت از پی، هد فشار و شیب هیدرولیکی حداکثر به منظور جلوگیری از شسته شدن مصالح سد را در هر نقطه از پی بدست می‌آید. امروزه با استفاده از روشهای تحلیل عددی و المان محدود، برنامه‌های کامپیوتری جهت ترسیم شبکه جریان و تعیین خصوصیات نشت نوشته شده است (کلکانی و میچالی[2]،۱۹۸۴).

در این تحقیق، یک روش حل برای آنالیز خصوصیات جریان (مقدار نشت و گرادیان خروجی) و مقادیر زیرفشار در یک سد نفوذناپذیر و با پرده‌سپری در پنجه و سیستم خاک دولایه و سه‌لایه، ارائه می‌شود. آنالیز خصوصیات جریان برای خاک دولایه در شرایط متفاوتی از عرض سد، عمق پرده‌سپر و نفوذپذیری لایه‌ها انجام شده است. برای نیل به این اهداف، از نرم افزار انسیس[3] استفاده شده که یک برنامه کامپیوتری فراگیر در المان محدود می‌باشد و تحلیلهایی در زمینه‌های دینامیکی، استاتیکی، انتقال حرارت، جریان سیالات، الکترومغناطیس و غیره ارائه می‌دهد. روش المان محدود، یک روش عددی است که می‌تواند برای دستیابی به مسائل (پایدار، گذرا، خطی و غیر خطی) بسیار متنوع در مهندسی بکار رود و از فرمول‌سازی انتگرالی به جای معادلات اختلاف استفاده می‌کند و سیستم معادلات جبری را بدست می‌دهد (اشراقی و همکاران،۱۳۸۳).

مواد و روشها

تشابه معادله جریان آب در خاک و انتقال حرارت

از جمله مباحث بسیار کاربردی در المان محدود، شباهت ریاضی یا آنالوژی بین معادلات دیفرانسیل حاکم بر سیستمها می‌باشد. استفاده از آنالوژی باعث می‌شود حداکثر استفاده از یک حل‌کننده خاص به عمل آید. نرم‌افزار انسیس معادلات لاپلاس را بصورت دوبعدی حل می‌کند و مواردی چون ماتریس خاک متخلخل، جریان هوا در خاک و توزیع فشار را می‌تواند شبیه-سازی نماید. قابلیت تحلیل مدلهای انتقال حرارت در آن بدین معناست که سیستمهایی را که رفتار آنها بصورت یک معادله دیفرانسیل مرتبه دو (مشابه معادله حاکم بر انتقال حرارت) باشد، تحلیل می‌نماید. لذا جهت تحلیل جریان آب از پی سد از روش تشابه‌سازی حرارتی استفاده شده است. فرضیاتی که در این تحقیق درنظر گرفته شده عبارتند از: ۱- تمام تحلیلها حرارتی می‌باشد. ۲- در کلیه آنالیزها جریان حالت پایدار، دو بعدی و آرام درنظرگرفته شده است. ۳- از اثرات اندرکنش حرارتی تنش-تغییر شکل بر دبی تراوش صرفنظر شده است. ۴- جریان آب در پی و تکیه‌گاهها از قانون دارسی تبعیت می‌کند. ۵- خاک دولایه و سه‌لایه، ایزوتروپ فرض شده‌اند. تشابه معادلات حرارت و معادلات نشت به صورت زیر می‌باشد(گریگول و سندنر[4]،۱۹۶۱؛ آنیسکین و راسکازو[5]، ۱۹۸۹) که بر اساس قانون اول ترمودینامیک، مقدار انرژی حرارتی در ماده (المان) ثابت است. با بکارگیری این قانون برای یک حجم کنترلی از ماده در دستگاه مختصات کارتزین رابطه زیر بدست می‌آید (هنگ و لو[6]، ۲۰۰۶):

$$\rho c\left(\frac{\partial T}{\partial t}+V_x\frac{\partial T}{\partial x}+V_y\frac{\partial T}{\partial y}\right)= \dot{q}+\frac{\partial}{\partial x}\left(K_x\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(K_y\frac{\partial T}{\partial y}\right) \qquad (۲)$$

که در آن c= گرمای ویژه ماده، ρ= چگالی ماده، T= دما، t= زمان، $\dot{q}$= نرخ تولید گرما در واحد حجم ماده، V_x, V_y = بردارهای سرعت انتقال حرارت و K_x, K_y = ضرایب هیدرولیکی ماده یا ضرایب هدایت گرمایی محیط و $\frac{\partial T}{\partial x}$، $\frac{\partial T}{\partial y}$ گرادیانهای دما می‌باشند. در معادله ۲ با قرار دادن نرخ تولید گرما در مدل برابر با صفر($\dot{q}$=0) و فرض عدم جذب گرما در خلال

1 . Feng and Wu
2. Kalkani and Michali
3. Ansys software
4. Grigall and Sandner
5. Aniskin and Rasskazov
6. Hong and Luo

انتقال حرارت توسط ماده (c = 0) و شرایط یکنواخت جریان حرارتی، معادله بالا بصورت زیر قابل ساده‌شدن است:

$$\frac{\partial}{\partial x}(K_x \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(K_y \frac{\partial T}{\partial y}) = 0 \qquad (۳)$$

معادله عمومی جریان آب در خاک اشباع غیر ایزوتروپ بر اساس قانون دارسی بصورت زیر است(کیوسیس و پانوس، ۲۰۰۲):

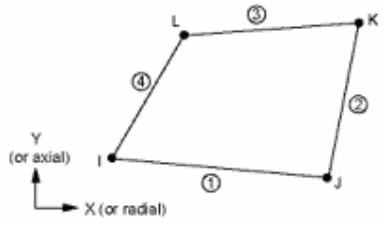
$$\frac{\partial}{\partial x}(K_x \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(K_y \frac{\partial h}{\partial y}) = 0 \qquad (۴)$$

از مقایسه روابط انتقال حرارت با روابط پیوستگی جریان، مشخص می‌گردد که ضریب نفوذپذیری معادل ضریب انتقال حرارت و خطوط جریان حرارتی معادل خطوط جریان نشت و دما معادل هد هیدرولیکی می‌باشد. در این تحقیق، پس از تشکیل شبکه المان محدود پی سد، شرایط مرزی به مدل اعمال می‌گردد. با توجه به اینکه مدل در نظر گرفته شده یک مدل حرارتی است، شرایط مرزی و پارامترهای نشت به پارامترهای حرارتی تبدیل شده و مورد تحلیل قرار گرفته است. سپس نتایج بدست آمده که پارامترهای حرارتی می‌باشند، بصورت پارامترهای نشت توجیه شده و مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. بارگذاری حرارتی بالادست و پایین‌دست سد نفوذناپذیر با توجه به سطح مبنا صورت گرفت که مقدار هد کل در بالادست سد و پایین‌دست با توجه به انتخاب مبنا، به عنوان مقدار دما تعریف می‌شوند. آنالیز حالت پایدار حرارتی می‌تواند خطی یا غیر خطی باشد. در صورتیکه خواص ماده موجود مستقل از دما باشد، آنالیز خطی و در صورت وابسته بودن خواص ماده به دما آنالیز غیر خطی است. به دلیل اینکه آنالیز انجام گرفته در این تحقیق خطی می‌باشد، از دو المان خطی PLANE35 (شش گرهی مثلثی) و PLANE55 (چهار گرهی مستطیلی)، المان چهار گرهی مستطیلی انتخاب شد. چون زمان محاسباتی و حجم ذخیره کمتر نسبت به المان حرارتی مثلثی نیاز دارد. المان PLANE55 یک درجه آزادی دارد که دمای گرهها است(شکل ۱). در این المان، انتقال حرارت همرفتی و یا بارهای حرارتی ثابت می‌توانند بعنوان بارهای خارجی به اضلاع وارد شوند. اطلاعات خروجی هم شامل دمای گرهها، گرادیان دما، مولفه‌های شار حرارتی و نسبت انتقال حرارتی می باشند. در این آنالیز فرض شده که ضخامت پرده‌سپر صفر می‌باشد. در طول قائم پرده‌سپر، چهار گره برای اتصال طرفین راست و چپ المانهای خاک کنار پرده‌سپر بکار رفته است. سپس این گرهها در هم ادغام شده‌اند (اشراقی و همکاران،۱۳۸۳) .

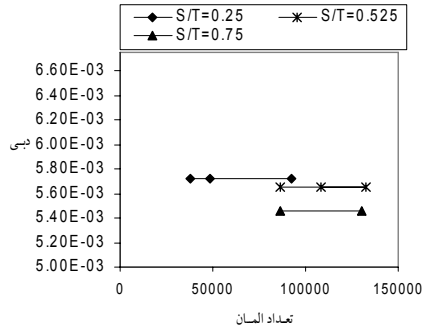
با توجه به مبانی روش المان محدود، هر قدر اندازه المان‌ها ریزتر و ابعاد آنها مساوی باشد، نتایج دقیق‌تر بدست می‌آید (اشراقی و همکاران،۱۳۸۳). لذا جهت انتخاب تعداد مش مناسب، آنالیز حساسیت بر روی تعداد المان در مدل برای خاک دو لایه در حالت B/T=1 و خاک سه لایه انجام شد. نتایج شکلهای ۲ و ۳ برای خاک دو لایه که در سه حالت مختلف عمق پرده سپر بررسی شده، نشان می‌دهد که افزایش تعداد المان‌ها تأثیری بر دبی نشت و گرادیان خروجی ندارد. لذا بر اساس سرعت اجرای مدل و حجم فایل های ذخیره شده مش‌بندی با تعداد المان مناسب انتخاب شد.

مدل عددی

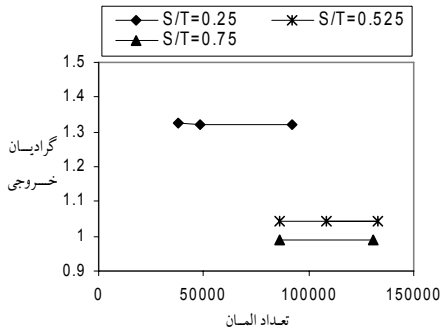
راه‌حلهایی که برای بدست آوردن خصوصیات نشت بکار می‌روند، حتی در ساختارهای ساده‌ای که در محیطهای لایه‌ای قرار دارند، با اشکالات ریاضی قابل توجهی مواجه می باشند (هار،۱۹۶۲). در این تحقیق یک روش حل برای آنالیز خصوصیات جریان (مقدار نشت و گرادیان خروجی) در یک سد نفوذناپذیر و با پرده‌سپری در پنجه و سیستم خاک دولایه و سه‌لایه، ارائه می‌شود. آنالیز خصوصیات جریان برای خاک دولایه در شرایط متفاوتی از عرض سد، عمق پرده‌سپر و نفوذپذیری لایه‌ها انجام شده است. در شکل‌های ۴ و ۵ به ترتیب نمایی از سد بر روی خاک دولایه و سه‌لایه نمایش داده شده است. در خاک دولایه، پی زیر سد شامل دو لایه خاک با ضخامتهای یکسان d و ضخامت کل T=2d می‌باشد. این آنالیز برای خاک سه‌لایه با ضخامت متغیر(d_1، d_2 و d_3 ضخامت لایه‌های خاک) و ضخامت مساوی لایه‌ها (ضخامتهای یکسان d و ضخامت کل T=3d) در یک عمق ثابت پرده‌سپر انجام شد و مقدار دبی نشت و گرادیان خروجی برای خاک دولایه و سه‌لایه تعیین شدند. در شکلهای مذکور، K_1، K_2 و K_3=ضرایب هیدرولیکی لایه‌های خاک،



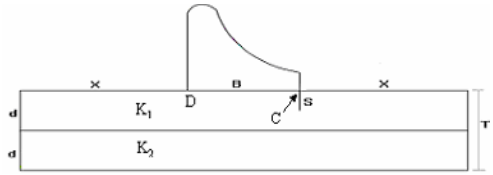
شکل۱- هندسه المان PLANE55



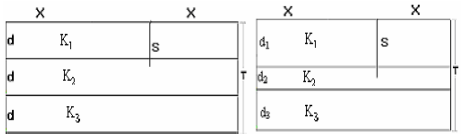
شکل۲- تأثیر تعداد المان بر دبی نشت



شکل۳- تأثیر تعداد المان بر گرادیان خروجی



شکل۴- خاک دولایه



شکل۵- خاک سه‌لایه متغیر و مساوی

S= عمق پرده سپر، B= عرض سد، h= اختلاف ارتفاع آب در بالادست و پایین‌دست سد، I_0= گرادیان خروجی، X= طولهای بالادست و پایین‌دست و q= مقدار نشت در واحد زمان می‌باشد. منحنی‌های بی‌بعدی بر اساس K_1h/q و I_0T/h و مقادیر متغیر S/T، B/T، K_3، K_2 و K_1 رسم شده‌اند که بوسیله این منحنی‌ها می‌توان دبی نشت و گرادیان خروجی را در پی‌های دولایه و سه-لایه بدست آورد. مقدارهای متغیر ε، S/T و B/T برای خاک دولایه در جدول ۱ نمایش داده شده‌اند. خاک سه‌لایه با ضخامت متغیر و مساوی در عمق ثابت S=0.525T و در حالت B/T=0 مورد بررسی قرار گرفت.

حالتهای مختلف نفوذپذیری برای خاک سه‌لایه نیز بوسیله دو پارامتر ε_1 و ε_2 که بصورت روابط زیر می‌باشند تعیین گردید:

جدول۱- مقادیر متغیر

ε	S/T	B/T
0	0.25	0
0.1	0.375	1
0.2	0.525	2
0.25	0.625	3
0.3	0.75	4
0.4	0.875	5
0.45		
0.5		

جدول۲- مقایسه I_0 با X در خاک دولایه

I_0	ε =0	ε =0.1	ε =0.2	ε =0.25
X =1.5B	0.82	0.84	0.89	0.94
X =3B	0.82	0.84	0.89	0.93
X =7.5B	0.82	0.84	0.89	0.93
X =9.38B	0.82	0.84	0.89	0.93
I_0	ε =0.3	ε =0.4	ε =0.45	ε =0.5
X =1.5B	1.02	1.29	1.48	1.59
X =3B	1	1.2	1.39	1.55
X =7.5B	0.99	1.18	1.38	1.82
X =9.38B	0.99	1.18	1.32	1.52

جدول۳- مقایسه q با X در خاک دولایه

$q(m^2/s)$	ε =0	ε =0.1	E =0.2	ε =0.25
	5.5	5.95	7.57	9.11
X =1.5B	E-04	E-04	E-04	E-04
	5.5	5.95	7.59	9.18
X=3B	E-04	E-04	E-04	E-04
	5.5	5.95	7.59	9.18
X =7.5B	E-04	E-04	E-04	E-04
	5.5	5.95	7.58	9.18
X =9.38B	E-04	E-04	E-04	E-04
$q(m^2/s)$	ε =0.3	ε =0.4	ε =0.45	ε =0.5
	1.16	2.13	2.78	3.18
X =1.5B	E-03	E-03	E-03	E-05
	1.18	2.56	4.46	6.29
X =3B	E-03	E-03	E-03	E-03
	1.18	2.64	5.5	1.22
X =7.5B	E-03	E-03	E-03	E-02
X =9.38B	1.18	2.64	5.72	1.9

جدول ۴- طول انتخابی برای خاک دولایه

X	B/T
9.38B	0
9.38B	1
4.38B	2
2.71B	3
1.97B	4
1.5B	5

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{\pi}\tan^{-1}\sqrt{\frac{K_2}{K_1}} \quad , \quad \varepsilon_2 = \frac{1}{\pi}\tan^{-1}\sqrt{\frac{K_3}{K_2}} \qquad (۵)$$

روش آنالیز

در این تحقیق ابتدا تأثیر مرزهای کناری بر روی دبی نشت و گرادیان خروجی بررسی شد. بطور تئوری، بزرگترین طول X همانطور که در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است، مناسب‌ترین گزینه می‌باشد. برای بررسی این تأثیر و انتخاب بهترین طول با افزایش تدریجی X، برنامه انسیس را اجرا و مقادیر دبی نشت و گرادیان خروجی مقایسه و طول مناسب انتخاب گردید.

خاک دولایه با X= 9.38B ،7.5B ،3B،1.5B و خاک سه‌لایه با X=5T,12.5T,18.75T,25T بررسی شدند. انتخاب مقدار افزایش تدریجی طولها بطور تصادفی بوده است. در خاک دولایه (جداول ۲ و ۳) بیشترین ناپایداری برای دبی نشت و گرادیان خروجی در $\varepsilon \geq 0.4$ دیده شد که در بزرگترین طول انتخابی این مقادیر به سمت اعداد ثابتی میل می‌کنند و تأثیر مرزهای کناری بر دبی نشت و گرادیان خروجی با افزایش طولهای بالادست و پایین‌دست خنثی می‌شود. بدلیل مشابه بودن عملیات از آوردن نتایج حاصل خودداری شده و فقط طول مناسب انتخابی X در هر B/T، در جدول ۴ برای خاک دولایه ارائه گردیده است. در خاک سه‌لایه با ضخامت متغیر و مساوی، افزایش طولهای بالادست و پایین‌دست تأثیری بر گرادیان خروجی نداشته‌اند، ولی اختلاف دبی نشت در $\varepsilon_1 \geq 0.4$ و $\varepsilon_2 \geq 0.4$ دیده شد که با افزایش طولهای بالادست و پایین‌دست اثر این اختلاف حذف می‌شود. بهترین طول انتخابی برای بالادست و پایین‌دست برای خاک سه‌لایه با ضخامت مساوی و متغیر، X=25T پیشنهاد شد.

پولوبارینوا-کوچینا منحنی‌های بی‌بعدی برای خصوصیات نشت (دبی نشت و گرادیان خروجی) در B/T=0 و حالتهای مختلف عمق پرده‌سپر و شرایط متفاوتی برای نفوذپذیری خاک دولایه ارائه داد (فنگ و وو،۲۰۰۶). برای کالیبراسیون مدل، پس از آنکه طول مناسب برای بالادست و پایین‌دست انتخاب شد، دبی نشت و گرادیان خروجی بصورت نمودارهایی بی‌بعد ارائه و با منحنی‌های پولو بارینوا-کوچینا و نمودارهای فنگ و وو مقایسه شدند که نتایج این مقایسه در شکل‌های ۶ و ۷ آورده شده است. مقایسه نشان‌دهنده این است که گرادیان خروجی و دبی نشت محاسبه شده توسط پولوبارینوا-کوچینا، و مقادیر فنگ و وو (۲۰۰۶) با نتایج حاصله از نرم افزار انسیس همخوانی بسیار نزدیکی دارند. همچنین پولوبارینوا-کوچینا برای برای مقادیر ε در نزدیکی 0.5، دبی را با معادله ۶ و گرادیان خروجی را برای مقادیر ε در نزدیکی 0.5 درS≥d با معادله ۷ و برای S<d را با استفاده از معادله ۸ محاسبه نمود(هار،۱۹۶۲):

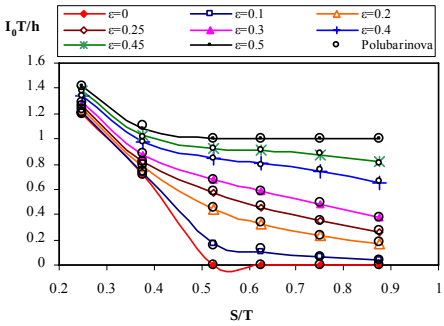
$$q = \frac{K_1 h}{2}\sqrt{\frac{K_2}{K_1}} \quad \rightarrow \quad \frac{K_1 h}{q} = \frac{2}{\sqrt{\frac{K_2}{K_1}}} = \frac{2}{\tan \pi\varepsilon} \qquad (۶)$$

$$(\varepsilon = 0.5 \quad , \frac{K_1 h}{q} = 0)$$

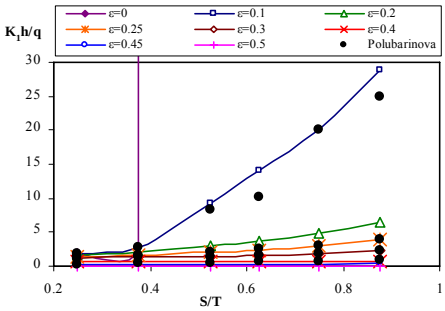
$$I_o \frac{T}{h} = 1 \qquad (۷)$$

$$I_o \frac{T}{h} = \frac{1}{\sin(\pi S/T)} \qquad (۸)$$

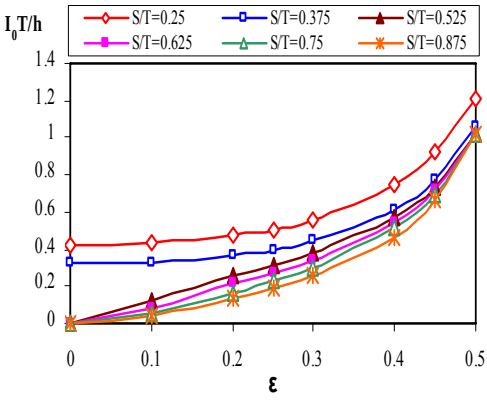
نتایج عددی معادلات ۶ و ۷ و ۸ در جدول ۵ آورده شده است که با مقادیر بدست آمده از انسیس کاملاً منطبق می‌باشد.



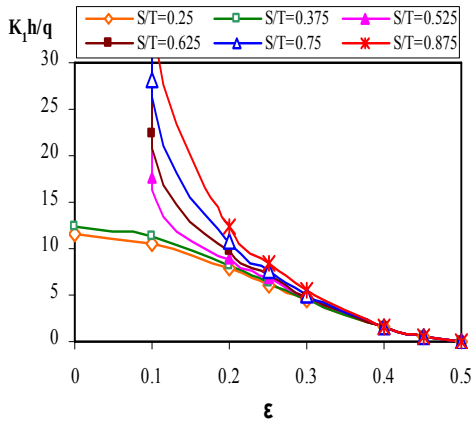
شکل۶- مقایسه نتایج گرادیان خروجی پولوبارینوا- کوچینا، فنگ و وو با انسیس



شکل۷- مقایسه نتایج دبی نشت پولوبارینوا-کوچینا، فنگ و وو با انسیس



شکل ۸- گرادیان خروجی در B/T=2



شکل ۹- دبی نشت در B/T=5

جدول۵- مقایسه نتایج انسیس

مقایسه	پولوبارینوا- کوچینا	انسیس	پولوبارینوا- کوچینا	انسیس
S/T	K_1h/q	K_1h/q	I_0T/h	I_0T/h
0.25	0	0.105	1.42	1.4179
0.375	0	0.106	1.1	1.0836
0.525	0	0.107	1	1
0.625	0	0.107	1	1
0.75	0	0.107	1	1
0.875	0	0.107	1	1

نتایج و بحث

با توجه به نتایج کالیبراسیون، بقیه منحنی‌ها برای B/T=1,2,3,4,5 بدست آمدند که به منظور بررسی اثر هر پارامتر، پارامترهای دیگر ثابت فرض شده‌اند و این امر به ازاء چندین حالت مختلف از پارامترهای ثابت انجام گرفته و نهایتاً منحنی‌هایی ترسیم شده است که چگونگی تأثیر متغیر موردنظر را در گرادیان هیدرولیکی خروجی و دبی نشت بدست می‌دهند و در تعیین هندسه مسأله، طول مناسب انتخابی برای بالادست و پایین‌دست در هر B/T، در نظر گرفته شده است تا اثر مرزهای جانبی بر میزان دبی نشت و گرادیان هیدرولیکی خروجی قابل اغماض باشد. نمونه‌ای از منحنی‌های بی‌بعد برای خاک دولایه در دو حالت B/T=2,5 و S/T=0.625 در شکل‌های ۸ الی ۱۳ و برای خاک سه‌لایه در شکل‌های ۱۴ الی ۱۷ نشان داده شده که تأثیر هر کدام از پارامترها در زیر مورد بررسی قرار گرفته است:

تأثیر تغییرات ضریب نفوذپذیری در خاک دولایه

در هر B/T، با ثابت بودن S/T و افزایش ε، مقدار گرادیان خروجی و دبی نشت افزایش می‌یابد(شکل‌های ۸ و ۹). چون با افزایش نفوذپذیری لایه زیرین، مقاومتی در مقابل جریان وجود نداشته و در نتیجه دبی نشت رفته رفته افزایش یافته و دبی نشت در ε=0.5 به بینهایت می‌رسد (شکل ۹).

تأثیر تغییرات عمق دیوار سپری در خاک دولایه

در هر B/T، با ثابت بودن ε و افزایش S/T، مسیر جریان افزایش و مقدار گرادیان خروجی و دبی نشت کاهش می‌یابد (شکل‌های ۱۰ و ۱۱). چون مسیر جریان آب در زیر سازه طولانی‌تر شده، در نتیجه میزان عبور آب از زیر سازه و گرادیان هیدرولیکی آب خروجی نیز کاهش می‌یابد و خطر آبشستگی ذرات و خالی شدن تدریجی خاک زیر پی تقلیل می‌یابد. اما اثر حاصل از افزایش عمق نصب، با افزایش نفوذپذیری لایه پایین، به سرعت کاهش می‌یابد. به طوری که اگر ε>0.3 باشد، مقدار نشت تقریباً مستقل از عمق نصب می‌شود (شکل ۱۱). اهمیت این مسأله در آن است که با افزایش عمق نصب پرده‌سپر، احتمال اتصال‌های معیوب بین قسمتهای مختلف آن احتمالاً زیاد خواهد شد. بنابراین برای ε>0.3 با ثابت بودن عرض سد، S=0.25T ماکزیمم عمق نصبی است که برای کاهش مقدار نشت پیشنهاد می‌شود. زمانی که ε=0.5 و S/T>0.5 باشد یعنی لایه بالایی به عنوان یک لایه

نفوذناپذیر عمل می‌کند و پرده‌سپر به لایه پایینی خاک دولایه نفوذ می‌کند، گرادیان خروجی مستقل از عمق نصب خواهد بود و عمق نصب پرده‌سپر به اندازه S=0.525T پیشنهاد می‌شود (شکل ۱۰). این نکته در مورد ε=0 (زمانی که لایه پایینی به عنوان یک لایه نفوذناپذیر باشد) نیز صدق می‌کند.

تأثیر تغییرات عرض سد در خاک دولایه

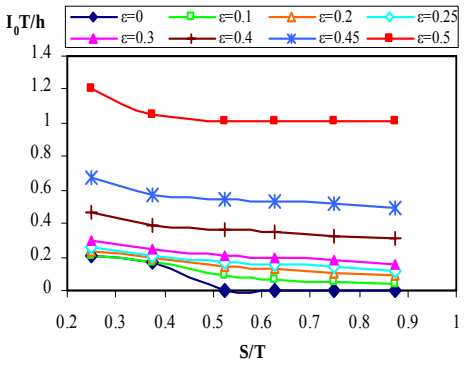
به ازاء ثابت بودن S/T و نفوذپذیری لایه‌ها، هرچه عرض سد نسبت به ضخامت پی افزایش می‌یابد، گرادیان خروجی و دبی نشت کاهش می‌یابند (شکل‌های ۱۲و ۱۳). چون مسیر جریان آب در زیر سازه طولانی‌تر شده و در نتیجه میزان عبور آب از زیر سازه، و گرادیان هیدرولیکی خروجی کاهش می یابد ولی اثر حاصل از افزایش عمق نصب با افزایش عرض سد نسبت به ضخامت پی، برای $\varepsilon \geq 0.4$ به سرعت کاهش می‌یابد و مقدار نشت تقریباً مستقل از عمق نصب می‌شود. بنابراین S=0.25T ماکزیمم عمق نصبی است که برای کاهش مقدار نشت پیشنهاد می‌شود (شکل ۱۳). همچنین زمانی که ε=0.5 وS/T>0.5 باشد یعنی لایه بالایی به عنوان یک لایه نفوذناپذیر عمل می‌کند و پرده‌سپر به لایه پایینی خاک دولایه نفوذ می‌کند، افزایش عرض سد نسبت به ضخامت پی تأثیری در مقدار گرادیان خروجی ندارد و مقدار گرادیان خروجی برابر با نسبت اختلاف ارتفاع آب بالادست و پایین‌دست به ضخامت پی (I_0=h/T) خواهد بود. بنابراین S=0.525T ماکزیمم عمق نصبی است که برای این حالت پیشنهاد می‌شود (شکل ۱۲) و زمانی که ε=0.5 و S/T<0.5 باشد یعنی لایه بالایی به عنوان یک لایه نفوذناپذیر عمل می‌کند و پرده‌سپر به لایه پایینی خاک دولایه نفوذ نمی‌کند، گرادیان هیدرولیکی خروجی برای $B/T \geq 2$ مستقل از افزایش مسیر خواهد بود. لذا افزایش عرض سد به اندازه دو برابر ضخامت پی کافی خواهد بود و مقدار S=0.25T ماکزیمم عمق نصب به ازاء افزایش عرض سد به اندازه دو برابر ضخامت پی پیشنهاد می‌شود (شکل ۱۲).

تأثیر تغییرات نفوذپذیری در خاک سه‌لایه

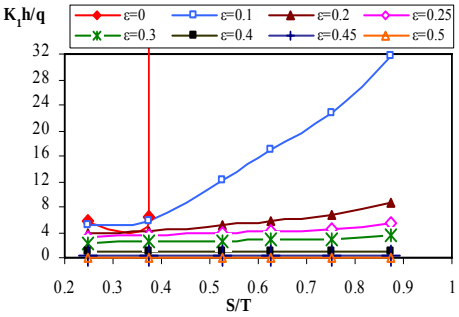
خاک سه‌لایه در دو حالت (شکل ۵) ضخامت‌های متغیر d_1=1.3d، d_2=0.75d و d_3=0.97d و ضخامتهای مساوی بررسی شد و نتایج دبی نشت و گرادیان خروجی در شکل‌های ۱۴ الی ۱۷ نشان داده شده است. در هر دو حالت، هر چه نفوذپذیری لایه‌های زیرین افزایش می‌یابد (یعنی کاهش مقاومت در مقابل جریان)، دبی نشت و گرادیان خروجی افزایش خواهند یافت.

زمانی که دبی نشت از لایه میانی بینهایت شده و اثر مقاومتی جریان تقلیل می‌یابد، به عبارتی در ε_1 =0.5 و مقادیر متفاوت ε_2، ماکزیمم مقدار گرادیان خروجی برای خاک سه‌لایه با ضخامت مساوی برابر 1.5h/T و برای خاک سه‌لایه با ضخامت متغیر برابر 1.2h/T جهت ضریب اطمینان در مقابل آبشستگی توصیه می‌شود (شکل‌های ۱۴ و ۱۷).

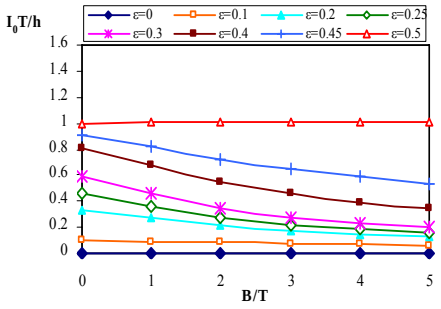
همچنین در این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار انسیس، مقادیر زیرفشار در خاک دولایه بررسی شد. بار هیدرولیکی در نقاط C و D (شکل ۴) بدست آمد و منحنی‌های بی‌بعد درصد اختلاف بار هیدرولیکی نقاط C و D بر اساس S/T، ε و B/T رسم شدند که در شکل‌های ۱۸ الی ۲۵ نشان داده شده اند که Δh اختلاف بار هیدرولیکی نقاط C و D و پارامتر h اختلاف ارتفاع آب در بالادست و پایین‌دست می‌باشد. از روی این نمودارها می‌توان مقادیر زیرفشار را با بررسی حالت‌های مختلف پرده‌سپر حاصل شده که تأثیر هر کدام از پارامترها در زیر مورد بررسی قرار گرفته است:



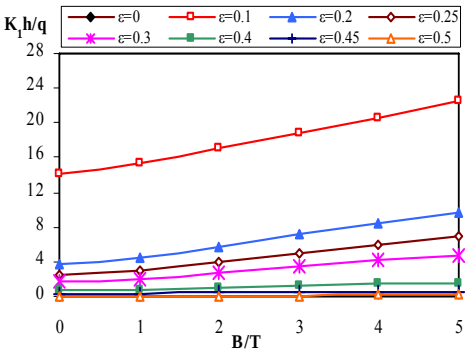
شکل ۱۰- گرادیان خروجی در B/T=5



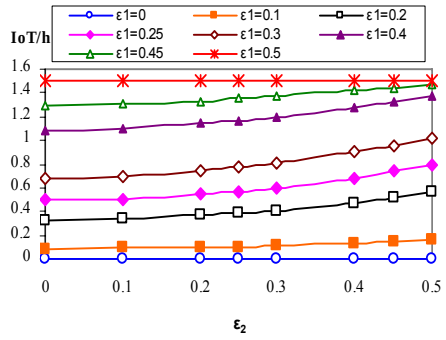
شکل ۱۱ - دبی نشت در B/T=2



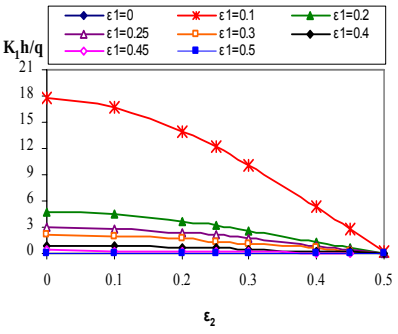
شکل ۱۲- گرادیان خروجی در S/T=0.625



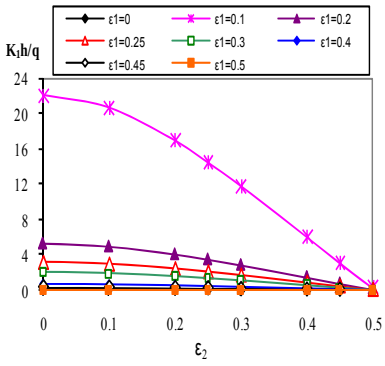
شکل ۱۳- *دبی نشت در* S/T=0.625



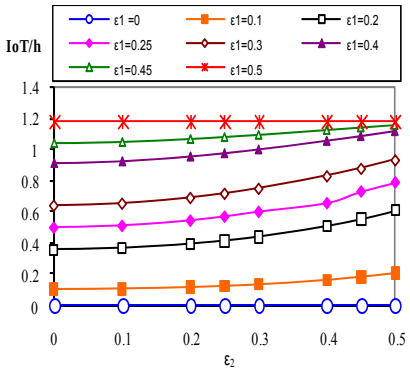
شکل ۱۴- گرادیان خروجی *سه لایه مساوی*



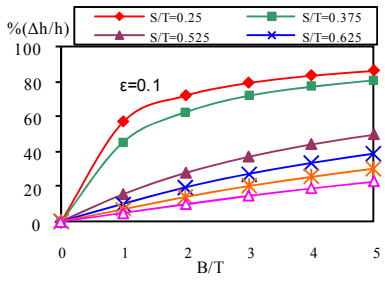
شکل ۱۵- *دبی نشت سه لایه متغیر*



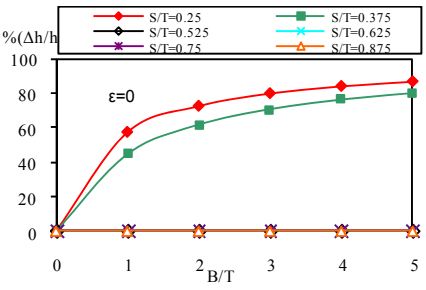
شکل ۱۶- *دبی نشت سه لایه مساوی*



شکل ۱۷- *دبی نشت سه لایه متغیر*



شکل ۱۸- اختلاف بار هیدرولیکی در ε=0.1



شکل ۱۹- اختلاف بار هیدرولیکی درε=0

تأثیر تغییرات عرض سد بر زیرفشار

به ازاء ثابت بودن عمق نصب و ضریب نفوذپذیری لایه‌ها، افزایش عرض سد سبب افزایش اختلاف بار هیدرولیکی و کاهش زیرفشار خواهد شد (شکل‌های ۱۸ الی ۲۱). چون مسیر جریان آب در زیر سازه طولانی‌تر شده و در نتیجه میزان عبور آب از پی و زیرفشار کاهش می‌یابد. به ازاء ε=0.5 (شکل ۲۱)، برای $B/T \geq 2$ و S/T>0.5، مقادیر زیرفشار مستقل از افزایش مسیر خواهد بود که حداکثر نسبت اختلاف بار هیدرولیکی نقاط C و D برای هر عمق نصبی برابر$\Delta h/h=0.493$ پیشنهاد می‌شود و ماکزیمم عمق نصب S=0.525T توصیه می‌گردد. همچنین با توجه به شکل ۲۱ برای $B/T \geq 2$ و S/T<0.5، زمانی که پرده‌سپر به لایه دوم نفوذ نکرده است، مقادیر زیرفشار مستقل از افزایش عمق نصب پرده‌سپر خواهد بود. ولی در اعماق کمتر نصب مقادیر زیرفشار کاهش می‌یابد. بنابراین برای این حالت، ماکزیمم عمق نصب S=0.25T برای کاهش مقادیر زیر-فشار پیشنهاد می‌شود.

تأثیر تغییرات نفوذناپذیری لایه زیرین بر مقادیر زیرفشار

به ازاء ε=0 (شکل ۱۹)، تا زمانی که پرده‌سپر به لایه زیرین نفوذ نکرده (S/T<0.5) با افزایش عرض سد، مقادیر درصد اختلاف بار هیدرولیکی از پاشنه به سمت نقطه C افزایش و در نتیجه مقادیر زیرفشار کاهش می‌یابد. بنابراین گشتاور نیروهای بالابر که تمایل به بلند کردن بدنه سد را دارند تقلیل می‌یابد. با نفوذ پرده‌سپر به لایه زیرین، مقادیر بار هیدرولیکی صفر می‌شوند و افزایش عرض سد در مقادیر زیرفشار تاثیری ندارد. لذا زمانی که لایه زیرین در خاک دولایه نفوذناپذیر باشد، افزایش عمق نصب بیش از نصف ضخامت پی نتایج یکسانی را برای مقادیر زیرفشار می‌دهد. لذا S=0.25T ماکزیمم عمق نصبی است که برای این حالت جهت کاهش مقادیر زیرفشار در هر عرضی از سد پیشنهاد می‌شود.

تأثیر تغییرات عمق نصب بر زیرفشار

به ازاء ثابت بودن عرض سد و نفوذپذیری لایه‌ها، هر چه عمق نصب افزایش یابد، مقادیر درصد اختلاف بار هیدرولیکی از پاشنه (نقطه D) به سمت نقطه C کاهش و زیرفشار افزایش می‌یابد (شکل‌های ۲۲ الی ۲۵). اگرچه افزایش عمق نصب، سبب کاهش سرعت جریان آب و شیب هیدرولیکی در زیر سازه می‌شود ولی چون افزایش عمق نصب پرده‌سپر باعث افزایش فشردگی خطوط جریان در کف پی می‌شود، لذا زیرفشار در زیر پی افزایش می‌یابد. از طرفی افزایش بیش از اندازه عمق نصب باعث افزایش زیرفشار در زیر سازه می‌گردد. لذا پیشنهاد می‌شود که حداقل عمق برای دیوار سپری پایین‌دست سازه برای مقابله با جوشش خاک در پی‌های نفوذپذیر و سست در عمل بکار رود.

بررسی زیرفشار در $\varepsilon \leq 0.4$ و S/T<0.5

به ازاء ثابت بودن عرض سد و عمق نصب، برای $\varepsilon \leq 0.4$ و S/T<0.5، مقادیر زیرفشار تقریباً مستقل از نفوذپذیری لایه‌ها خواهد بود (شکل‌های ۲۲ الی ۲۵). یعنی مقادیر زیرفشار فقط تابع عمق نصب می‌باشند و در اعماق کمتر نصب پرده‌سپر مقادیر زیرفشار کاهش می‌یابد. چون افزایش عمق نصب باعث افزایش فشردگی خطوط جریان در کف پی می‌شود، لذا زیرفشار در پی افزایش می‌یابد. بنابراین S=0.25T ماکزیمم عمق نصبی است که برای $\varepsilon \leq 0.4$ و کاهش زیرفشار پیشنهاد می‌شود.

بررسی زیرفشار در $\varepsilon \leq 0.4$ و S/T>0.5

در این حالت مقادیر اختلاف بار هیدرولیکی افزایش یافته و زیرفشار در عرض سد به سمت پنجه کاهش می‌یابد. یعنی وقتی نفوذپذیری لایه زیرین به سمت بینهایت میل می‌کند، مقدار سرعت جریان و شیب هیدرولیکی در عرض پی کاهش یافته و در نتیجه کاهش حضور آب در حفرات و ناپیوستگی‌ها، زیرفشار ایجاد شده در پی نیز کاهش و ضریب اطمینان در مقابل لغزش افزایش می‌یابد (شکل‌های ۲۲ الی ۲۵).

بررسی زیرفشار در $\varepsilon > 0.4$

برای $\varepsilon > 0.4$ و S/T<0.5، مقادیر اختلاف بار هیدرولیکی کاهش یافته و مقادیر زیرفشار نسبت به حالت $\varepsilon \leq 0.4$ مقداری افزایش می‌یابد. همچنین زمانی که $\varepsilon > 0.4$ و S/T>0.5 باشد، مقادیر زیرفشار نسبت به $\varepsilon \leq 0.4$ افزایش می‌یابد. این اختلاف به دلیل ناپایداری مدلهای عددی در نفوذپذیری‌های بینهایت می‌باشد (شکلهای ۲۲ الی ۲۵).

کاربرد منحنی‌های بی‌بعد

نمودارهای بی‌بعد این امکان را می‌دهند که مشکلات نشت را بدون نیاز به برنامه کامپیوتری پیش‌بینی و راه‌حلهای بدست آمده از برنامه‌های کامپیوتری را مقایسه و صحت و سقم این برنامه‌ها را تحقیق نمود. همچنین در مواقع تحقیق، برای طراحی اپتیمم سدهای نفوذناپذیر و تصمیم‌گیری سریع با صرف کمترین زمان، بسیار مفید بوده و می‌توان از آنها بدون نیاز به آنالیزهای سنگین آزمون و خطا طراحی‌های بهینه را انجام داد.

نتیجه‌گیری

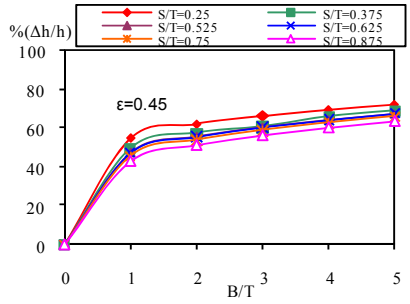
بطور کلی افزایش مسیر جریان(عمق نصب پرده‌سپر یا عرض سد) در زیر سازه، باعث می‌شود میزان عبور آب و در نتیجه گرادیان خروجی و دبی نشت کاهش یافته، خطر آبشستگی ذرات و خالی شدن تدریجی خاک زیر پی تقلیل یابد. اما افزایش عمق نصب سبب فشردگی خطوط جریان در کف پی و افزایش زیرفشار می‌گردد. لذا پیشنهاد می‌شود که حداقل عمق برای دیوار سپری پایین‌دست سازه جهت مقابله با جوشش خاک در پی‌های نفوذ-

پذیر و سست به عمل آید. ولی اگر افزایش مسیر درعرض سد باشد، فشردگی خطوط جریان در کف پی ایجاد نمی‌شود و زیر-فشار کاهش می‌یابد.

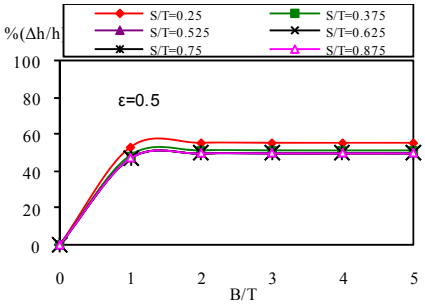
همچنین با افزایش عمق نصب پرده‌سپر، احتمال اتصال‌های معیوب و مشکلات اجرایی وجود دارد. لذا برای $\varepsilon \geq 0.4$ (با ثابت بودن عرض سد)، S=0.25T ماکزیمم عمق نصبی است که برای کاهش مقدار نشت توصیه می‌شود. برای $\varepsilon < 0.4$ و S/T<0.5 (با ثابت بودن عرض سد) مقادیر زیرفشار مستقل از نفوذپذیری لایه‌ها و فقط تابع عمق نصب بوده که S=0.25T ماکزیمم عمق نصب پیشنهادی می‌باشد. برای $\varepsilon < 0.4$ و S/T>0.5، (با ثابت بودن عرض سد) مقدار سرعت جریان، شیب هیدرولیکی در عرض پی، حضور آب در حفرات و نا-پیوستگی‌ها و زیرفشار در عرض سد به سمت پنجه کاهش یافته و ضریب اطمینان در مقابل لغزش افزایش می‌یابد که بهینه‌ترین عمق نصب برای این حالت S=0.525T پیشنهاد می‌شود.

زمانی که ε=0.5 باشد (یعنی لایه بالایی به عنوان یک لایه نفوذناپذیر عمل می‌کند) برای S/T>0.5 و $B/T \geq 2$، گرادیان خروجی و مقادیر زیرفشار مستقل از افزایش مسیر بوده و S=0.525T ماکزیمم عمق نصب و B=2T ماکزیمم عرض سد پیشنهاد می‌شود. همچنین برای S/T<0.5 و $B/T \geq 2$ نیز گرادیان خروجی و مقادیر زیرفشار مستقل از افزایش مسیر بوده و S=0.25T ماکزیمم عمق نصب و B=2T ماکزیمم عرض سد توصیه می‌شود.

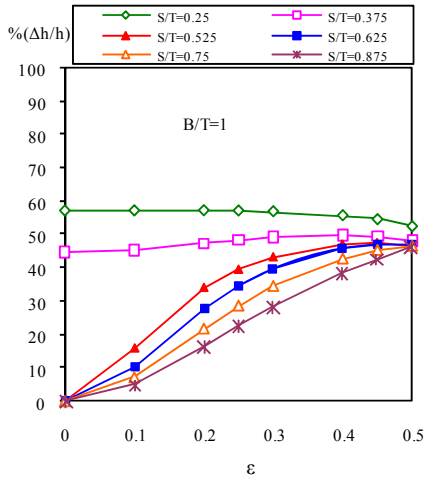
زمانی که ε=0 باشد (یعنی لایه پایینی به عنوان یک لایه نفوذناپذیر عمل می‌کند) برای S/T>0.5، گرادیان خروجی و مقادیر زیرفشار مستقل از افزایش مسیر بوده و S=0.525T ماکزیمم عمق نصب پیشنهادی می‌باشد.



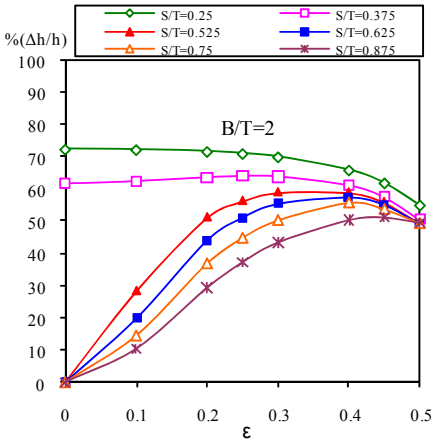
شکل ۲۰- اختلاف بار هیدرولیکی در ε=0.45



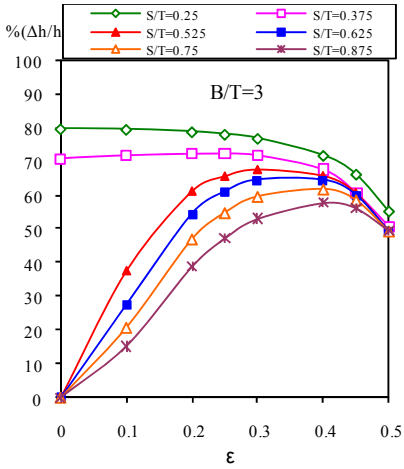
شکل ۲۱- اختلاف بار هیدرولیکی در ε=0. 5



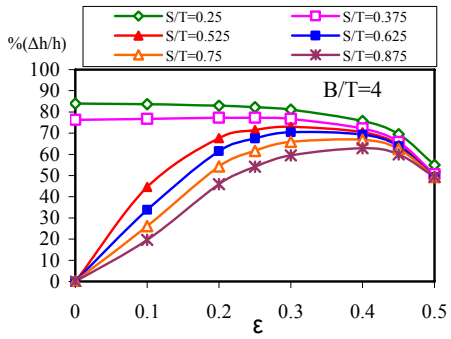
شکل ۲۲- اختلاف بار هیدرولیکی در B/T=1



شکل ۲۳- اختلاف بار هیدرولیکی در B/T=2



شکل ۲۴- اختلاف بار هیدرولیکی در B/T=3



شکل ۲۵- اختلاف بار هیدرولیکی در B/T= 4

منابع

۱. اشراقی، م. جاهد مطلق، ح. و م. نوبان. ۱۳۸۳.اجزاء محدود ANSYS .انتشارات دانشگاه تهران، ۹۸۱ صفحه.

۲. بیرامی، م. ک. و و. قربانیان. ۱۳۸۲. تأثیر دیوارهای سپری بر زیرفشار و دبی نشت در پی‌های نفوذپذیر ضخیم. چهارمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه شیراز، صفحات ۱۲۰۰-۱۱۹۳.

۳. خالقی، ح. رحیمی، ح. و م. صدقی اصل. ۱۳۸۴. اثر موقعیت بهینه پرده آب بند قائم در کاهش نشت و سرعت جریان در زیر سازه‌های آبی با استفاده از مدل عددی. پنجمین کنفرانس هیدرولیک ایران. دانشگاه شهید باهنر کرمان، ۳۴۸-۳۴۱.

۴. رسولی، ک. و ا. شمسائی. ۱۳۸۴. آشکارسازی و مقابله با نشت از سد ها. انتشارات دانشگاه علم وصنعت ایران، ۵۶۰ صفحه.

۵. سروش، ح. و ا. فهیمی فر. ۱۳۸۴. اصول طراحی پی در سدسازی. انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۴۶۷ صفحه.

6. Abdulrahman, A. and J. Mardini. 2010. Seepage analysis under dams with vertical sheet pile using Schwarz-Christoffel transformation. International Journal of Geotechnical Engineering, 4(4):537-547.

7. Aniskin, N. A. and L. N. Rasskazov. 1989. Seepage in earth dam in two and three dimensional formulations of the problem. Journal of Power Technology and Engineering (Formerly hydrotechnical construction), 23(11): 648-656.

8. Feng, Z. Y. and J. T. H. Wu. 2006. The epsilon method: analysis of seepage beneath an impervious dam with sheet pile on a layered soil. Canadian Geotechnical Journal, 43: 59-69.

9. Grigull, U. and H. Sandner. 1961. Heat conduction; International Series In Heat and Mass Transfer, New York.

10. Harr, M. E. 1962. Ground water and seepage. 1st Edition, New Yourk.

11. Hong, C. and G. Y. Luo. 2006. Using zero-thickness elements to simulate suspended cut-off walls in a regional seepage field. Computers and Geotechnics Journal, 33(6-7):305-315.

12. Kalkani, E. C. and A. J. Michali. 1984. Steady flow calculation for cutoff wall depth variation. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 110(7): 899-907.

13. Kiousis, A. M and D. Panos. 2002. Least-squares finite- element evaluation of flow nets. Journal of Geotechnical and Geoenviromental Engineering, 128(8):699-701.