

## تأثیرات دیواره آب بند و زهکش بر نیروی زیر فشار و گرادیان خروجی زیر سازه‌های آبی با حل عددی معادله عمومی جریان آب در خاک به روش احجام محدود

رسول قبادیان<sup>۱\*</sup> - کریم خدائی<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت: ۸۸/۳/۳۰

تاریخ پذیرش: ۸۸/۶/۸

### چکیده

از جمله اقداماتی که برای جلوگیری از پدیده زیرشویی، کاهش گرادیان خروجی و همچنین دبی نشت از زیر سازه‌های آبی صورت می‌گیرد احداث دیواره‌های آب بند و نصب زهکش می‌باشد. از این رو در این تحقیق به منظور بررسی دقیق تأثیر هر یک از عوامل مذکور بر نیروی زیر فشار و گرادیان خروجی مدلی کامپیوتری تهیه شده است که در آن معادله عمومی جریان آب در خاک همگن اشباع در شرایط همسان و غیر همسان با استفاده روش احجام محدود و الگوریتم گوس-سایدل حل شده است. به منظور صحت سنجی مدل تهیه شده از نتایج اندازه گیری آزمایشگاهی و همچنین نتایج مدل WinMseep که یک مدل پذیرفته شده است استفاده گردید. یکی از مزیت‌های نسبی مدل مذکور در نظر گرفتن نفوذپذیری برای پرده آب بند می‌باشد. نتایج این تحقیق نشان داد که با احداث یک دیواره آب بند در هر وضعیت مکانی، مقدار گرادیان خروجی نسبت به گرادیان خروجی مینا (بدون دیوار آب بند) کاهش می‌یابد. همچنین بیشترین نیروی زیر فشار و کمترین گرادیان هیدرولیکی خروجی در موقعیتی که دیوار آب بند در پائین دست احداث شود، دیده می‌شود. در شرایط وجود دو پرده آب بند یکی در پاشنه و دیگری در پنجه سد و یک زهکش در حد فاصل آنها هر چقدر زهکش در فاصله بیشتری از پاشنه احداث شود تأثیر آن در کاهش نیروی زیر فشار کل و گرادیان خروجی بیشتر می‌باشد. علاوه بر این با افزایش عمق پرده آب بند بالادست در مقایسه با پرده آب بند پائین دست مقدار گرادیان خروجی کاهش می‌یابد. شدت این کاهش برای پرده آب بند پائین دست با عمق کوتاه تر مشهود تر می‌باشد. توزیع فشار بالا برنده و گرادیان خروجی محاسبه شده برای شرایط خاک همسان و غیر همسان در زیر سازه تطابق بسیار نزدیکی با نتایج مدل WinMSeep داشت.

**واژه‌های کلیدی:** سازه هیدرولیکی، دیواره آب بند، زیر فشار، گرادیان خروجی، احجام محدود

### مقدمه

می‌رود ایجاد دیواره‌های آب بند می‌باشد. دیواره‌های آب بند که غالباً نفوذ ناپذیر می‌باشند و یا خیلی کم نفوذ پذیرند باعث کند کردن و کم کردن حرکت آب زیر سازه آبی می‌شوند و در نتیجه از ایجاد فشار توسط آب در زیر سازه جلوگیری می‌کنند. کاهش شدت زیر فشار ناشی از ایجاد دیواره آب بند تحت عنوان فاکتور شدت بیان می‌شود. فاکتور شدت برابر است با نسبت واقعی زیر فشار در حالتی که دیواره آب بند وجود دارد به شدت زیر فشار در حالت بدون دیواره آب بند (۷). صدقی اصل و همکاران (۴) به بررسی اثر موقعیت بهینه پرده آب بند قائم در کاهش نشت و سرعت جریان در زیرسازه‌های آبی با استفاده از مدل عددی پرداختند و به این نتیجه رسیدند که بهترین مکان برای کنترل نشت و زیر شویی، پاشنه و پنجه سد می‌باشد. ابول پور (۲) مدلی پیشنهاد کرد که زیر فشار وارده بر سازه‌های هیدرولیکی را با چند روش متفاوت محاسبه می‌کرد، در محاسبه میزان زیر فشار و زیرشویی

یکی از نیروهای مخربی که در جهت عدم پایداری سدها و بندهای انحرافی عمل می‌کند نیروی زیر فشار است که ناشی از جریان آب در محیط متخلخل پی سدها و بندهای انحرافی می‌باشد. این نیرو مقاومت برشی بین سد و پی آن را کاهش می‌دهد و باعث ایجاد تنش کششی شده و در نهایت منجر به لغزش و واژگونی سد می‌شود. گرادیان خروجی نیز مهمترین معیار طراحی برای ضریب اطمینان نسبت به زیرشویی می‌باشد. از جمله اقداماتی که برای کاهش نیروی زیر فشار و همچنین کاهش گرادیان خروجی به کار

۱ و ۲- استادیار و دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی،

دانشگاه رازی

(\* - نویسنده مسئول: Email: [rsghebadian@gmail.com](mailto:rsghebadian@gmail.com))

دیوارها و زهکش بر مقدار نیروی زیر فشار و گرادیان خروجی جریان می‌باشد.

## مواد و روش‌ها

### معادلات حاکم

معادله عمومی جریان در توده خاک غیر همگن و غیر همسان بدون هر گونه منبع تغذیه و تخلیه که بنام معادله ریچاردز نیز معروف می‌باشد بصورت زیر تعریف می‌شود (۱).

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) \quad (1)$$

که در آن  $h$  بیانگر بار آبی و  $K_x, K_y, K_z$  بیانگر ضریب نفوذپذیری در جهت‌های عمودی ( $z$ ) و طولی ( $x$ ) و عرضی ( $y$ ) می‌باشند.  $\theta$  رطوبت حجمی توده خاک می‌باشد.

در شرایط جریان ماندگار و توده خاک اشباع  $\frac{\partial \theta}{\partial t} = 0$ ، بنابراین

رابطه (۱) برای جریان دو بعدی به صورت زیر خلاصه می‌شود:

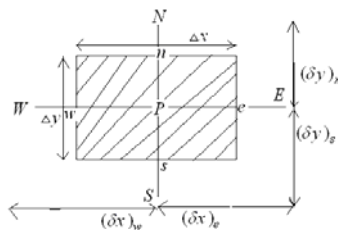
$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) = 0 \quad (2)$$

در شرایطی که منبع تغذیه یا تخلیه در توده خاک مورد نظر وجود داشته باشد معادله (۱) برای جریان دو بعدی به شکل رابطه (۳) اصلاح می‌گردد:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) - \frac{q}{dx dy} \quad (3)$$

که در آن  $q$  مثبت شرایط زهکشی و  $q$  منفی شرایط تغذیه را نشان می‌دهد.

در این تحقیق برای منفصل کردن معادله‌های دیفرانسیلی ۳و۲ از روش حجم کنترل (F.V) استفاده شده است (۱۰). با منفصل نمودن معادله (۲) روی حجم کنترل نشان داده شده در شکل ۱ رابطه ۴ بدست می‌آید.



(شکل ۱) - معرفی نقطه P و حجم کنترل آن

$$(K_x)_e \frac{h_e - h_p}{(\delta x)_e} \Delta y + (K_x)_w \frac{h_w - h_p}{(\delta x)_w} \Delta y + (K_y)_n \frac{h_n - h_p}{(\delta y)_n} \Delta x + (K_y)_s \frac{h_s - h_p}{(\delta y)_s} \Delta x = 0 \quad (4)$$

داشته باشد در این شرایط معادله (۳) روی حجم کنترل منفصل شده و رابطه ۵ بدست می‌آید.

در شرایطی که نقطه مرکزی حجم کنترل (P) بر روی مرز نفوذ

از روش‌های لین و بلای و خوسلا، و در محاسبه میزان نشت از روش خوسلا و شبکه جریان استفاده کرد. میزان خطایی را که وی برای نتایج مدل و داده‌های پیژومتری یک سد دورودزن بدست آورد چهار درصد بود. صباغ یزدی و بیات (۶) از روش عددی گالرکین - احجام محدود برای مدلسازی تراوش در پی سدهای بتنی وزنی و حل معادلات حاکم بر پدیده تراوش در محیط مذکور استفاده کردند و مدلی را تهیه نمودند. نامبردگان اشاره نمودند که مدل مذکور برای مسائل با پیچیدگی‌های هندسی قابل استفاده است. عابدی کوپایی (۷) مقادیر بار فشاری را با چهار روش بلای، لین، خوسلا و تفاضل محدود بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که در دو روش بلای و لین زیرفشار کمتر از خوسلا می‌باشد و زیر فشار حاصل از تفاضل‌های محدود انطباق خوبی با روش خوسلا دارد. علاوه بر این توصیه کردند که روش تفاضلهای محدود در طراحی سدهای انحرافی استفاده شود. صیادزاده و زمردیان (۵) خصوصیات جریان را در سدهای نفوذ ناپذیر با عرض متغیر و پرده سپر در عمق‌های مختلف پنجه پایین دست، روی سیستم‌های خاک دو لایه و سه لایه بررسی کردند و مقدار جریان و گرادیان خروجی را برای تمام شرایط تعیین کردند و نتایج به دست آمده را به صورت نمودارهای بی بعدی به نام منحنی‌های اسپیلن ارایه دادند. جباری (۳) با ارایه مدل ریاضی سه بعدی حرکت آب در محیط متخلخل ناهمگن ناهمسان را مورد بررسی قرار داد. این مدل توانایی تحلیل محیطهای سه بعدی و ناهمگن همسان و با لایه‌بندی‌های مختلف را دارد. یافنگ و همکاران (۱۱) برای حل مشکلات نشت با سیستم‌های زهکش سد، حل عددی ارائه دادند که از روش المان محدود استفاده می‌کرد. پاکباز و همکاران (۹) با مدل 3-D SEEP به ارزیابی ساخت دیوار آبند بتن پلاستیک در تکیه گاه راست و چپ سد خاکی کرخه در کاهش مقدار تراوش پرداختند. نتایج آنها نشان داد که با ساخت دیوار آبند چپ و راست مقدار تراوش به ترتیب ۶۰ و ۲۰ درصد کاهش می‌یابد.

همانگونه که اشاره شد از روشهای متفاوتی برای تعیین خصوصیات جریان زیر سازه‌های آبی (دبی تراوش، فشار بالابرنده و گرادیان خروجی) استفاده می‌شود که از آن جمله می‌توان به روشهای تجربی بلای، لین، روش ریاضی خوسلا، شبکه جریان و روشهای عددی اشاره نمود. هدف از این تحقیق استفاده از روش عددی حجم کنترل برای حل معادله عمومی جریان در شرایط اشباع به منظور پی بردن به موقعیت بهینه دیوار (های) آب بند و بررسی تأثیر توأم این

هر یک از جملات فوق بیانگر دبی ورودی یا خروجی از هر یک از مرزهای حجم کنترل می‌باشد.

همچنین وقتی درون حجم کنترل منبع تغذیه یا زهکشی وجود

آبی لازم است معادلات (۴) یا (۵) با استفاده از شرایط مرزی به روشهای عددی حل شود. در شکل (۲) محدوده ای که معادلات بر آن منفصل شده اند به همراه مرزهای با شرایط متفاوت نشان داده شده است. که عبارتند از:

ناپذیر یا بریکی از گوشه‌های محدوده شبکه بندی شده قرار بگیرد مطابق حالت‌های نشان داده شده در جدول ۱ معادله ۲ به اشکال متفاوت منفصل می‌شود:

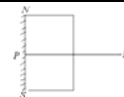
### شرایط مرزی

به منظور تعیین مقادیر زیر فشار و گرادینان خروجی از زیر سازه

$$(K_x)_e \frac{h_E - h_P}{(\delta x)_e} \Delta y + (K_x)_w \frac{h_W - h_P}{(\delta x)_w} \Delta y + (K_y)_n \frac{h_N - h_P}{(\delta y)_n} \Delta x + (K_y)_s \frac{h_S - h_P}{(\delta y)_s} \Delta x - q = 0 \quad (5)$$

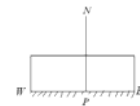
### جدول ۱- حالت‌های مختلف منفصل سازی معادله دوبعدی جریان وقتی برخی مرزهای حجم کنترل مسدود باشد

$$(K_x)_e \frac{h_E - h_P}{(\delta x)_e} \Delta y + (K_y)_n \frac{h_N - h_P}{(\delta y)_n} \frac{\Delta x}{2} + (K_y)_s \frac{h_S - h_P}{(\delta y)_s} \frac{\Delta x}{2} = 0$$



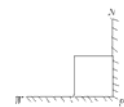
حالت ۱

$$(K_x)_e \frac{h_E - h_P}{(\delta x)_e} \frac{\Delta y}{2} + (K_x)_w \frac{h_W - h_P}{(\delta x)_w} \frac{\Delta y}{2} + (K_y)_n \frac{h_N - h_P}{(\delta y)_n} \Delta x = 0$$

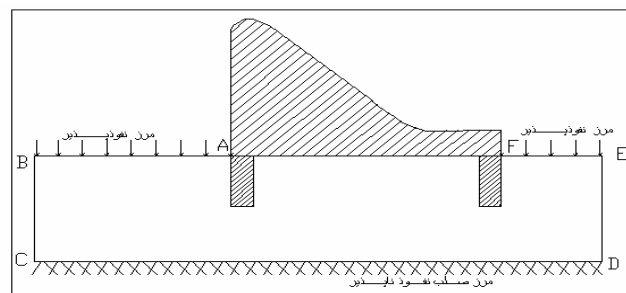


حالت ۲

$$(K_x)_w \frac{h_W - h_P}{(\delta x)_w} \frac{\Delta y}{2} + (K_y)_n \frac{h_N - h_P}{(\delta y)_n} \frac{\Delta x}{2} = 0$$



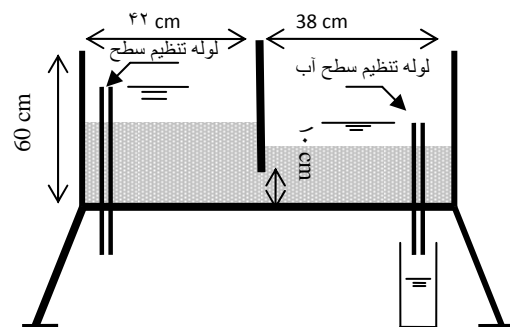
حالت ۳



شکل (۲) - معرفی شرایط مرزی



ب



الف

شکل (۳) - الف) مشخصات هندسی تانک تراوش (seepage tank) با پهنای ۳۸ سانتی متر ب) تانک تراوش در حال آزمایش

یک دیدار آیند از جنس شیشه ۱۰ میلی متری که از کف مخزن ۱۰ سانتی متر بالاتر قرار دارد نصب گردید (شکل ۳). دو لوله تخلیه برای تنظیم اختلاف سطح آب بالادست و پائین دست در دو طرف دیوار آیند و نزدیک دیواره های کناری مخزن در نظر گرفته شده است. به منظور ثابت نگه داشتن سطح آب در بالادست (سمت چپ مخزن در شکل ۳) در طول آزمایش همواره مقداری آب بیشتر از دبی نشت به داخل مخزن تزریق گردید و آب مازاد توسط لوله زهکش سمت چپ تخلیه می شود. لوله زهکشی سمت راست مقدار دبی نشت کرده از توده خاک را نشان می دهد. در داخل مخزن تراوش ماسه کاملاً شسته شده با دانه بندی یکنواخت، رد شده از الک شماره ۴۰ و مانده روی الک شماره ۶۰ (اندازه ذره ۰/۲۵ میلیمتر) ریخته شد.

## نتایج و بحث

### صحت سنجی مدل با داده های اندازه گیری شده

صحت سنجی مدل نوشته شده در این تحقیق با اندازه گیری مقدار دبی تراوش از مخزن تراوش در دو مرحله انجام شد. در آزمایش اول ارتفاع لایه ماسه ریخته شده در بالا دست تانک تراوش (قسمت سمت چپ در شکل ۳) برابر ۱۹/۵ سانتی متر و در پائین دست (قسمت سمت راست) ۱۶ سانتی متر در نظر گرفته شد. رقوم سطح آب از کف تانک در بالا دست و پائین دست تانک تراوش به ترتیب ۴۲/۵ و ۲۵ سانتی متر تنظیم گردید. با اندازه گیری حجمی جریان خارج شده از لوله سمت راست مخزن مقدار دبی تراوش  $Q = 1.609 \times 10^{-5} m^3 / s$  بدست آمد. سپس مدل عددی تهیه شده برای شرایط آزمایش اول با نفوذ پذیری های مختلف اجرا گردید. نهایتاً مقدار نفوذ پذیری توده ماسه داخل مخزن  $k = 4.25 \times 10^{-4} m / s$  محاسبه گردید. در آزمایش دوم ارتفاع لایه ماسه ریخته شده در بالا دست برابر ۲۲ سانتی متر و در پایاب ۱۴ سانتی متر در نظر گرفته شد. رقوم سطح آب از کف مخزن در بالادست و پائین دست به ترتیب ۴۲/۵ و ۳۰ سانتی متر تنظیم گردید. تحت این شرایط دبی تراوش اندازه گیری شده به طریق حجمی برابر  $Q = 1.2 \times 10^{-5} m^3 / s$  و دبی محاسبه شده با مدل برای همان نفوذ پذیری محاسبه شده در آزمایش اول برابر  $Q = 1.132 \times 10^{-5} m^3 / s$  بدست آمد که کمتر از ۶ درصد با مقدار اندازه گیری شده اختلاف دارد و این خود نشان از دقت مدل دارد.

پس از صحت سنجی مدل با داده های آزمایشگاهی به منظور دسترسی به اهداف این تحقیق و بررسی تاثیر دیوار آب بند و زهکش بر نیروی زیر فشار و گرادیان خروجی، سازه بند انحرافی (شکل ۲) به طول ۱۶ متر بر روی توده خاک با ضخامت ۱۰ متر وقتی رقوم سطح آب در بالادست ۲۰ متر و در پائین دست ۱۰ متر است برای شرایط

CD- مرز نفوذناپذیر است که از آن هیچ نوع جریانی در جهت محور yها بین دو محیط وجود ندارد به عبارتی مرز با گرادیان صفر می باشد.  $(\frac{\partial h}{\partial y} = 0)$

ED و BC - مرزهایی که در آنها گرادیان جریان در جهت محور xها صفر است  $(\frac{\partial h}{\partial x} = 0)$ .

FE و AB - مرز نفوذ پذیر، مرز با بار آبی مشخص در این تحقیق بار آبی روی مرز AB ۲۰ متر و روی مرز آبی EF ۱۰ متر در نظر گرفته شده است.

### روش حل دستگاه معادلات حاکم

پس از شبکه بندی محدوده زیر سازه شکل ۲ معادله ۴ و در صورت وجود زهکش معادله ۵ برای هر یک از اجزای کنترل نوشته می شود. همانگونه که در بالا اشاره شد این معادلات برای زمانی که مرز حجم کنترل بر روی مرزهای نفوذناپذیر محدوده قرار گیرد با استفاده از معادله های نوشته شده در جدول ۱ جایگزین می شوند. دستگاه معادلات حاکم با استفاده از روش تکراری گوس-سایدل حل شد و نهایتاً مقادیر بار آبی در مرکز هر المان بدست آمد. در روش تکراری گوس-سایدل در ابتدا مقادیر بار آبی در نقاط مختلف حدس زده شد و سپس مطابق رابطه زیر مقادیر جدید بدست می آیند:

$$a_p h_p^{k+1} = a_e h_e^k + a_w h_w^k + a_n h_n^k + a_s h_s^k \quad (8)$$

که در آن :

$$a_w = (K_x)_w \frac{\Delta y}{(\Delta x)_w}, a_e = (K_x)_e \frac{\Delta y}{(\Delta x)_e}, a_n = (K_y)_n \frac{\Delta x}{(\Delta y)_n}, a_s = (K_y)_s \frac{\Delta x}{(\Delta y)_s}$$

$$a_p = a_w + a_e + a_s + a_n \quad (9)$$

مدل تهیه شده در این تحقیق به منظور ورود شرایط مرزی، موقعیت و مشخصات دیواره های آب بند، موقعیت و دبی زهکش، شبکه بندی محدوده و نهایتاً حل دستگاه معادلات حاکم به زبان ویژوال بیسیک نوشته شده است. یکی از مزیت های نسبی مدل مذکور این است که می توان برای دیواره آب بند ضخامت و نفوذ پذیری در نظر گرفته شود. برخی دیواره های آب بند از جنس Bentonite-Cement slurry یا دیواره های آب بند از مصالح خاک - سیمان (Soil-Cement) نفوذ پذیر هستند.

### مشخصات مدل فیزیکی

به منظور صحت سنجی مدل با داده های اندازه گیری شده، مخزن تراوش از شیشه ۱۰ میلی متری ضد ضربه که بر روی پایه های فلزی نصب شده است ساخته شد. پهنای مخزن تراوش ۳۸ سانتی متر و طول آن ۸۱ سانتی متر می باشد. در داخل مخزن تراوش

خطای نسبی و حداکثر خطای مطلق به ترتیب ۰/۹۹۵، ۰/۰۱۴ و ۰/۴۱ متر برای مقادیر زیر فشار محاسبه شده در دو مدل مذکور می باشد. علاوه بر این گرادیان خروجی محاسبه شده توسط مدل حاضر و مدل WinMseep به ترتیب ۱/۸۸۸ و ۱/۸۹ است که نشان دهنده دقت بسیار بالای مدل حاضر می باشد. همچنین خطوط هم پتانسیل با توجه به مقادیر بار آبی محاسبه شده توسط مدل برای حالت میناء در شکل (۵) نشان داده شده اند.

#### دیواره آب بند منفرد

این حالت به منظور تعیین بهترین موقعیت دیوار آب بند برای کاهش زیر فشار و گرادیان خروجی در نظر گرفته شده است. با انتخاب دیواره آب بند (با عمق انتخابی ۵ متر) در موقعیت های متفاوت زیر بند انحرافی مقادیر گرادیان خروجی و زیر فشار کل در هر وضعیت با گرادیان خروجی و زیر فشار کل حالت میناء مقایسه گردید. علاوه بر این به منظور صحت سنجی مدل برخی وضعیت ها با نتایج مدل WinMseep مقایسه شد. برای مثال در وضعیتی که دیواره آب بند در پایین دست سازه باشد نتایج به دست آمده توسط دو مدل مذکور در جدول ۲ و شکل ۶ نشان داده شده است. همانطوریکه مشاهده می شود نتایج به دست آمده از مدل ریاضی تهیه شده با نتایج به دست آمده از مدل WinMseep برازش خوبی باهم دارند. علاوه بر این در شکل ۷ برای حالتی که دیوار آب بند در پائین دست سازه باشد خطوط هم پتانسیل در توده خاک زیر سازه با توجه به مقادیر بار آبی محاسبه شده نشان داده شده است.

مختلف مدل شد. همچنین به منظور بررسی دقت مدل برای شرایط متفاوت از شرایط آزمایشگاهی ذکر شده در بالا، در برخی موارد نتایج مدل مذکور با نتایج نرم افزار WinMseep که یک نرم افزار شناخته شده و معتبر می باشد مقایسه شد. لازم به ذکر است که مدل WinMseep معادله عمومی جریان آب در خاک را با استفاده از روش المانهای محدود منفصل می نماید در حالیکه در این تحقیق از روش احجام محدود استفاده شده است. در ادامه نتایج بدست آمده برای شرایط مختلف به تفکیک ارائه شده است:

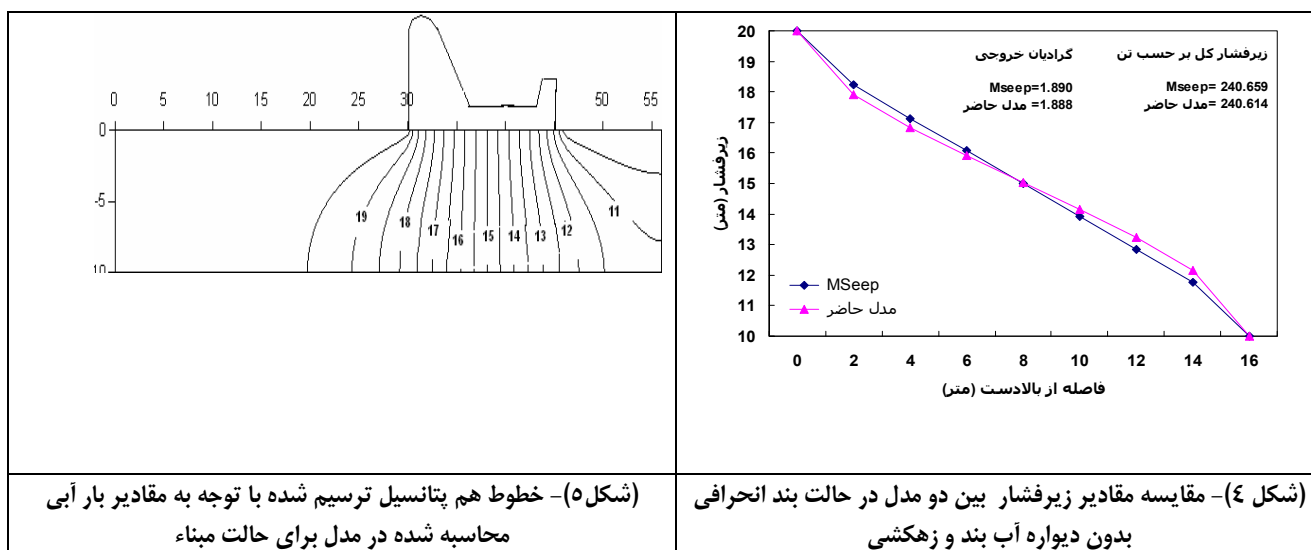
#### خاک همسان و همگن $K_x = K_y$

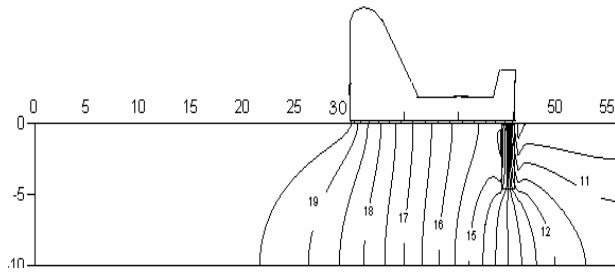
در این حالت نفوذ پذیری توده خاک در هر دو جهت افقی و قائم یکسان و برابر  $k = 1 \times 10^{-4} m / sec$  در نظر گرفته شد. همچنین نفوذپذیری دیوار آبنند در هر دو جهت عمودی و افقی  $k = 1 \times 10^{-9} m / sec$  به مدل معرفی گردید.

#### بند انحرافی بدون دیواره آب بند و زهکش

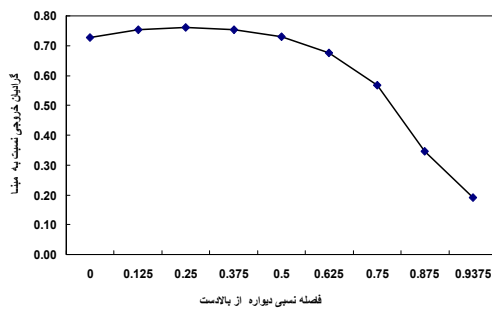
این حالت به عنوان مینا در نظر گرفته شده است. زیر فشار محاسبه شده در نقاط مختلف زیر سازه توسط مدل WinMseep و مدل حاضر و همچنین نیروی کل زیر فشار وارد بر سازه و گرادیان خروجی با هم مقایسه شده است که در جدول ۲ و شکل ۳ نشان داده شده است.

مقادیر زیر فشار ارائه شده در جدول ۲ و همچنین شکل ۴ نشان می دهد که مقادیر به دست آمده از دو مدل برازش خوبی باهم دارند. مقایسه های آماری نشان داد که مجذور ضریب همبستگی، میانگین





(شکل ۷) - خطوط هم پتانسیل ترسیم شده با توجه به مقادیر بار آبی محاسبه شده در مدل برای حالت دیوار آب بند پائین دست

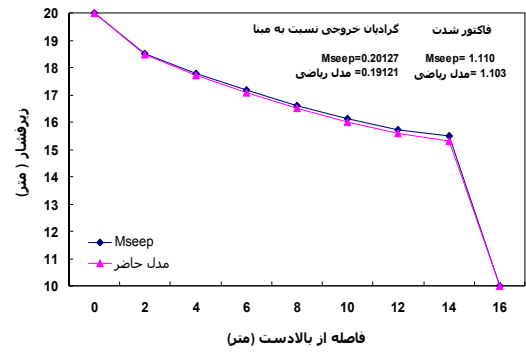


(شکل ۹) - مقادیر گرادیان خروجی نسبی در مقابل موقعیت نسبی دیوار آب بند

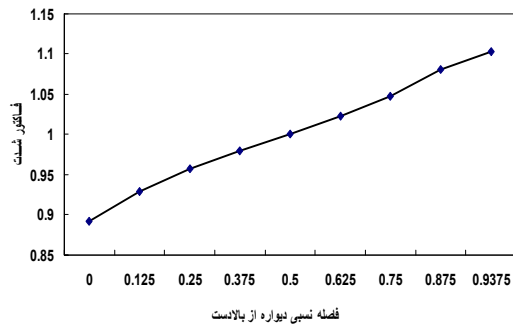
مبنا به دست می‌آید.

### دو دیواره آب بند با عمق متفاوت، یکی در بالادست و دیگری در پایین دست

این حالت به منظور بررسی تأثیر نسبت عمق‌های مختلف دو دیواره آب بند بر روی گرادیان خروجی و زیر فشار کل در نظر گرفته شده است. دو دیواره آب بند با طول مختلف یکی در بالادست و دیگری در پایین دست لحاظ شده است. ابتدا برای حالتی که عمق دیواره آب بند بالادست ۵ متر و عمق دیواره آب بند پایین دست ۱ متر باشد نتایج به دست آمده از مدل ریاضی با مدل WinMseep مقایسه شد و همانگونه که در جدول ۲ و شکل ۱۰ نشان داده شده است مدل ریاضی تهیه شده با نتایج به دست آمده از مدل WinMSeep برای این حالت نیز تطابق خوبی باهم دارند. سپس تأثیر نسبت عمق‌های مختلف دو دیواره آب بند بر روی گرادیان خروجی نسبی و زیر فشار کل نسبی مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۱۱ خطوط هم پتانسیل در زیر سازه را برای حالتی که دو دیوار آب بند هم عمق در بالادست و پائین دست قرار داشته باشند برای مقادیر بار آبی محاسبه شده نشان می‌دهد.



(شکل ۶) - مقایسه مقادیر زیر فشار بین دو مدل در حالت دیواره آب بند منفرد

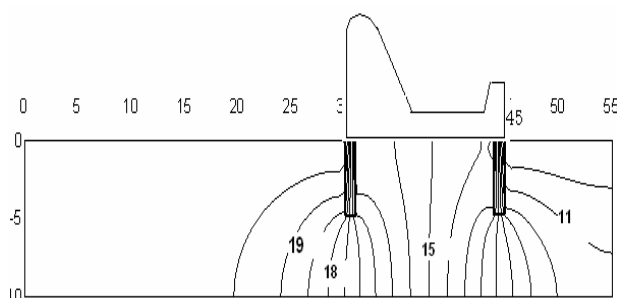


(شکل ۸) - مقادیر فاکتور شدت در مقابل موقعیت نسبی دیوار آب بند

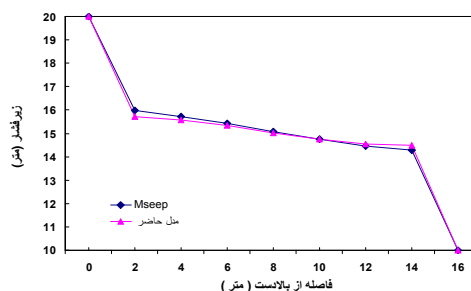
مقادیر فاکتور شدت (نسبت زیر فشار کل به زیر فشار کل حالت مبنا) و گرادیان خروجی نسبت به گرادیان خروجی مبنا (گرادیان خروجی نسبی) برای وضعیت‌های مختلف احداث دیواره آب بند در زیر سازه که از مدل ریاضی حاضر به دست آمده است، در اشکال ۸ و ۹ نشان داده شده است.

با دقت در نمودارهای مذکور نتایج زیر بدست می‌آید:

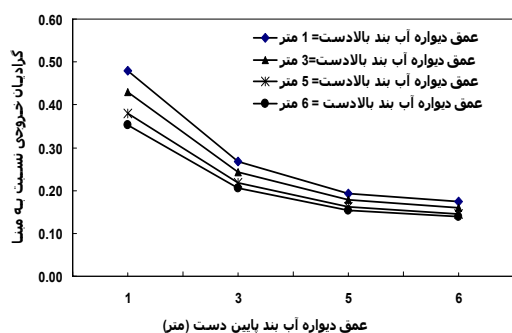
- ۱- کمترین زیر فشار کل و بیشترین گرادیان خروجی موقعی حاصل می‌شود که دیواره آب بند در بالادست احداث شود.
- ۲- با احداث دیواره آب بند در هر وضعیت مکانی، مقدار گرادیان خروجی نسبت به گرادیان خروجی مبنا کاهش می‌یابد. با این حال گرادیان خروجی از موقعیت نسبی صفر تا موقعیت نسبی ۰/۲۵ افزایش و از موقعیت ۰/۶۲۵ تا موقعیت نسبی ۱ به شدت کاهش می‌یابد.
- ۳- با احداث دیواره آب بند در موقعیت نسبی صفر تا ۰/۵، فاکتور شدت کمتر از یک می‌شود. از موقعیت نسبی ۰/۵ تا پایین دست انحرافی همانطور که مشاهده می‌شود مقدار فاکتور شدت بیش از یک به دست می‌آید. یعنی زیر فشار در این وضعیت‌ها بیشتر از زیر فشار



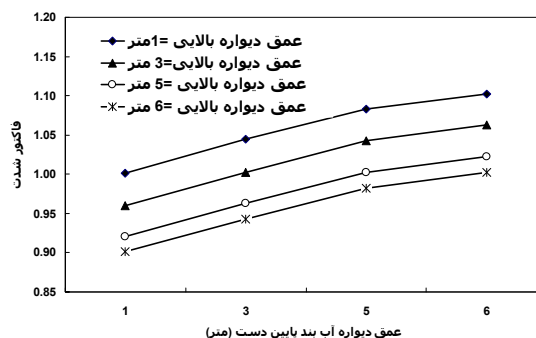
(شکل ۱۱) - خطوط هم پتانسیل ترسیم شده برای حالت دو دیوار آبند هم عمق در بالادست و پائین دست



(شکل ۱۰) - مقایسه مقادیر زیر فشار بین دو مدل برای حالت دو دیواره آب بند با عمق متفاوت



(شکل ۱۳) - مقایسه گرادیان خروجی نسبت به حالت مبنای برای حالت‌های مختلف عمق دو دیواره آب بند



(شکل ۱۲) - مقایسه فاکتور شدت برای حالت‌های مختلف عمق دو دیواره آب بند

عمق دیوار آب بند بالادست بر کاهش گرادیان خروجی نسبی بیشتر است.

### دو دیواره آب بند، یکی در بالادست و دیگری در پایین دست و یک زهکش در بین دو دیواره

این حالت به منظور بررسی تأثیر موقعیت زهکش بر مقدار زیر فشار و گرادیان خروجی مورد توجه قرار گرفته است. بدین منظور یک زهکش در عمق ۲ متری در فواصل مختلف از پاشنه سد بین دو دیوار آب بند بالائی با عمق یک متر و دیوار پائینی با عمق ۵ متر قرار داده شده است. دبی خروجی زهکش ۳ لیتر بر ثانیه فرض شده است.

به منظور صحت سنجی مدل مذکور در این حالت نیز ابتدا برای حالتی که زهکش در فاصله ۸ متری از پاشنه احداث شده است نتایج به دست آمده از اجرای مدل ریاضی با مدل WinMSeep مقایسه شد که نتایج در جدول ۲ و شکل ۱۴ ارائه شده است.

مقادیر جدول ۲ و همچنین شکل ۱۴ نشان می‌دهند در شرایط احداث زهکش نیز مدل ریاضی ارائه شده در این تحقیق از دقت خوبی برخوردار است.

در شکل ۱۲ مقادیر فاکتور شدت برای حالت‌های مختلف عمق دو دیواره آب بند در بالادست و پایین ترسیم شده است. همانطور که مشاهده می‌شود:

۱- با افزایش عمق دیوار آب بند پائین دست نسبت به عمق دیوار آب بند بالادست مقدار فاکتور شدت افزایش می‌یابد.

۲- وقتی که عمق دو دیواره آب بند یکسان باشد، مقدار فاکتور شدت تقریباً برابر یک می‌باشد. در صورتیکه اگر عمق دیوار آب بند بالادست بزرگتر از عمق دیوار پائین دست باشد فاکتور شدت کمتر از یک است به عبارتی مقدار زیر فشار کل در مقایسه با حالت مبنای کاهش می‌یابد.

مقادیر گرادیان خروجی نسبی برای حالت‌های مختلف عمق دو دیواره آب بند در بالادست و پایین دست، در شکل ۱۳ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود:

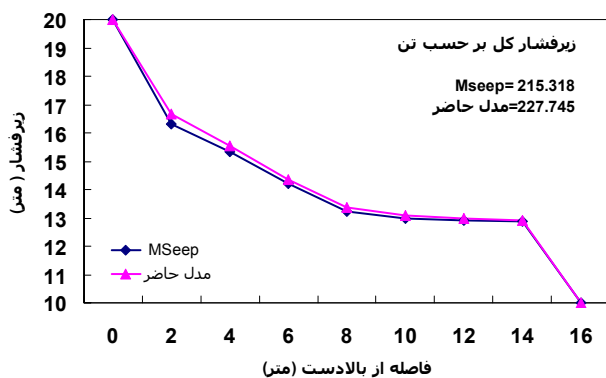
۱- صرفنظر از عمق دیوار آب بند بالادست، با افزایش عمق دیواره پایین دست مقدار گرادیان خروجی کاهش می‌یابد و همواره کوچکتر از یک می‌باشد.

۲- وقتی عمق دیواره آبند پائین دست کوچک است تأثیر افزایش

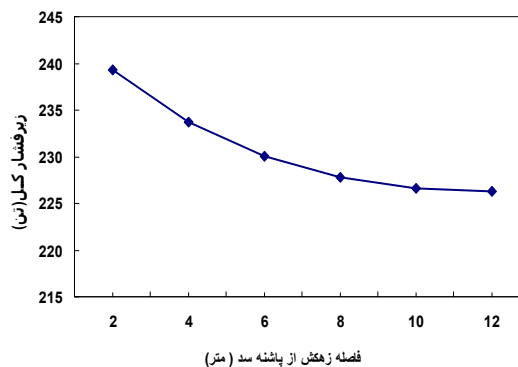
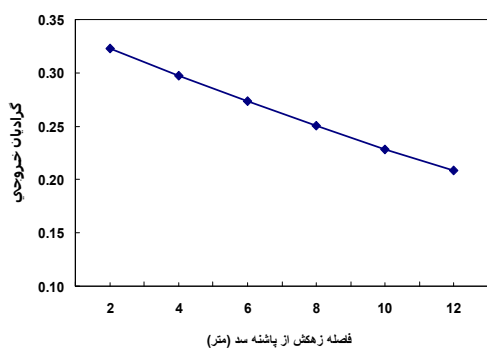


زهکش در فاصله بیشتری از پاشنه احداث شود تأثیر آن در کاهش زیر فشار کل و گرادیان خروجی بیشتر می‌باشد اما این تأثیر بطور کلی خیلی زیاد نیست.

پس از صحت سنجی، تأثیر فاصله زهکش از پاشنه سد بر مقدار گرادیان خروجی و زیر فشار کل مورد بررسی قرار گرفت که نتایج در اشکال ۱۵ و ۱۶ نشان داده شده است. با دقت در نمودارهای فوق می‌توان استدلال کرد که هر چه قدر



(شکل ۱۴) - مقایسه مقادیر زیر فشار محاسبه شده توسط دو مدل برای حالت دو دیواره آب بند، یکی در بالاست و دیگری در پایین دست و یک زهکش در بین دو دیواره



(شکل ۱۵) - تأثیر فاصله زهکش از پاشنه بر زیر فشار کل (شکل ۱۶) - تأثیر فاصله زهکش از پاشنه بر گرادیان خروجی

(جدول ۲) - مقادیر زیر فشار محاسبه شده (بر حسب متر آب) با مدل حاضر و مدل WinMseep در حالت‌های مختلف ( $K_x = K_y$ )

دو دیواره آب بند یک زهکش در بین دو دیواره		دو دیواره آب بند با عمق متفاوت		دیواره آب بند منفرد		بدون دیواره آب بند و زهکش (حالت مبناء)		فاصله از بالادست سد (متر)
mseep	مدل حاضر	mseep	مدل حاضر	mseep	مدل حاضر	mseep	مدل حاضر	
۲۰	۲۰	۲۰/۰۰۰	۲۰/۰۰۰	۲۰/۰۰۰	۲۰/۰۰۰	۲۰	۲۰	۰
۱۶/۳۰۵	۱۶/۶۶۵	۱۵/۹۸۱	۱۵/۷۱۵	۱۸/۵۱۷	۱۸/۴۷۴	۱۸/۲۴۳	۱۷/۸۹۴	۲
۱۵/۳۱۸	۱۵/۵۵۰	۱۵/۷۱۵	۱۵/۵۷۴	۱۷/۷۸۵	۱۷/۷۲۳	۱۷/۱۳۶	۱۶/۸۳۸	۴
۱۴/۱۹۴	۱۴/۳۶۷	۱۵/۴۲۴	۱۵/۳۲۴	۱۷/۱۶۴	۱۷/۰۸۸	۱۶/۰۶۳	۱۵/۹۱۷	۶
۱۳/۲۲۵	۱۳/۳۵۷	۱۵/۰۸۱	۱۵/۰۲۹	۱۶/۶۰۶	۱۶/۵۱۸	۱۴/۹۹۴	۱۵/۰۳۸	۸
۱۲/۹۸۴	۱۳/۰۷۹	۱۴/۷۳۹	۱۴/۷۴۹	۱۶/۱۱۶	۱۶/۰۱۲	۱۳/۹۲۶	۱۴/۱۵۸	۱۰
۱۲/۹۲۷	۱۲/۹۸۹	۱۴/۴۴۶	۱۴/۵۴۵	۱۵/۷۱۸	۱۵/۵۹۶	۱۲/۸۵۵	۱۳/۲۳۲	۱۲
۱۲/۸۷۴	۱۲/۹۰۷	۱۴/۲۶۹	۱۴/۴۸۱	۱۵/۴۸۶	۱۵/۲۹۸	۱۱/۷۵۲	۱۲/۱۶۴	۱۴
۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰/۰	۱۰	۱۰	۱۶



### خاک غیر همسان $K_x \neq K_y$

در این حالت نفوذپذیری خاک در دو جهت افقی و قائم متفاوت و به ترتیب معادل  $k_x = 1 \times 10^{-4} m/sec$  و  $k_y = 4 \times 10^{-4} m/sec$  در نظر گرفته شد. همچنین نفوذ پذیری دیوار آبنده در هر دو جهت افقی و قائم  $k = 1 \times 10^{-8} m/sec$  به مدل معرفی شد. سپس مدل مذکور برای سه حالت تشریح شده در ذیل اجرا و نتایج با نرم افزار WinMseep مقایسه شد.

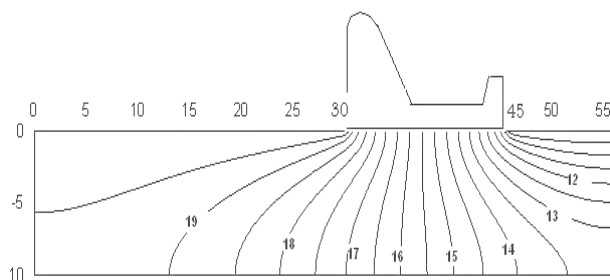
### بند انحرافی بدون دیواره آب بند

این حالت به عنوان مبناء در نظر گرفته شده است. زیر فشار حاصل از مدل Mseep و مدل نوشته شده در این تحقیق در فواصل مختلف از بالادست بند انحرافی و همچنین نیروی زیر فشار کل وارد بر سازه و گرادیان خروجی با هم مقایسه شده است. در جدول ۳ و شکل ۱۷ نتایج این حالت ارائه شده است. مقادیر ارائه شده در جدول ۳ و همچنین شکل ۱۷ نشان می‌دهند که دو مدل برازش خوبی دارند.

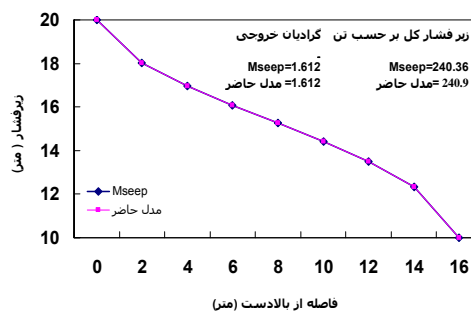
در شکل ۱۸ خطوط هم پتانسیل ترسیم شده با توجه به خروجی مدل این تحقیق نشان داده شده است.

### دیواره آب بند منفرد

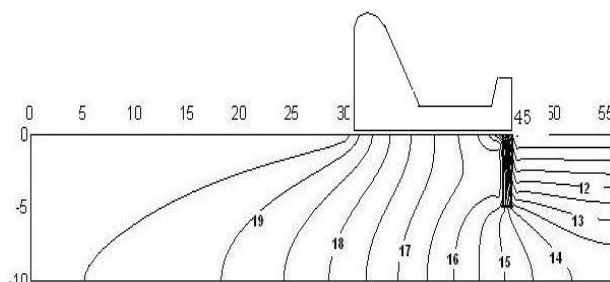
با انتخاب دیواره یک دیوار آبنده (با عمق انتخابی ۵ متر) در موقعیت‌های متفاوت زیر بند انحرافی مقادیر گرادیان خروجی و زیر فشار کل محاسبه و با مقادیر متناظر در حالت مبناء مقایسه شد. علاوه بر این به منظور صحت سنجی مدل برخی وضعیت‌ها با نتایج مدل WinMseep مقایسه شد. برای مثال در وضعیتی که دیواره آب بند در پایین دست سازه باشد نتایج به دست آمده توسط دو مدل مذکور در جدول ۳ و شکل ۱۹ نشان داده شده است. همانطوریکه مشاهده می‌شود نتایج به دست آمده از مدل ریاضی تهیه شده با نتایج به دست آمده از مدل WinMseep برازش خوبی باهم دارند. علاوه بر این در شکل ۲۰ برای حالتی که دیوار آب بند در پائین دست سازه باشد خطوط هم پتانسیل در توده خاک زیر سازه با توجه به داده‌های بدست آمده ترسیم شده است.



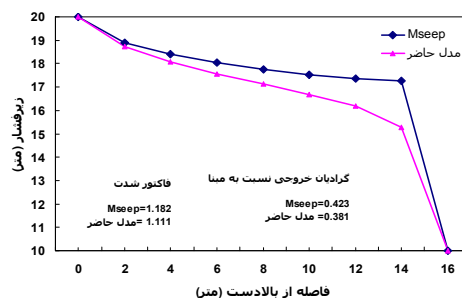
(شکل ۱۸) - خطوط هم پتانسیل ترسیم شده با توجه به خروجی مدل این تحقیق



(شکل ۱۷) - مقادیر زیر فشار محاسبه شده توسط دو مدل برای حالت بند انحرافی بدون دیواره آب بند



(شکل ۲۰) - خطوط هم پتانسیل ترسیم شده با توجه به خروجی مدل این تحقیق

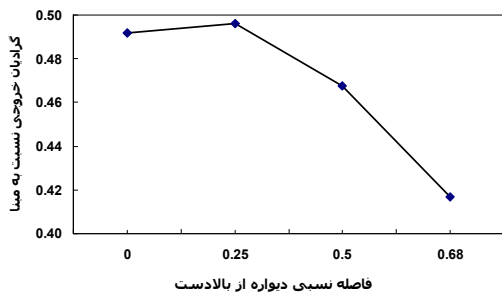


(شکل ۱۹) - مقایسه مقادیر زیر فشار محاسبه شده توسط دو مدل برای حالت دیواره آب بند منفرد

مختلف دو دیواره آب بند بر روی گرادیان خروجی و زیرفشار کل مورد بررسی قرار گرفت. (اشکال ۲۴ و ۲۵). نتایجی که با دقت در این نمودارها به دست می‌آید مشابه نتایجی است که از نمودارهای ۱۲ و ۱۳ به دست آمد که قبلاً مورد بحث قرار گرفت.

### نتیجه گیری

در این تحقیق به منظور بررسی دقیق تأثیر موقعیت، تعداد و عمق دیواره‌های آب بند و همچنین وجود زهکش بر نیروی زیر فشار و گرادیان خروجی در زیر سازه بند انحرافی، مدلی کامپیوتری تهیه شده است که در آن معادله عمومی جریان آب در خاک همگن اشباع در شرایط همسان و غیر همسان با استفاده روش احجام محدود منفصل سازی می‌شود. معادلات جبری حاکم به روش گوس-سایدل حل شدند. به منظور صحت سنجی مدل تهیه شده از نتایج آزمایشگاهی و نتایج مدل WinMseep که یک مدل پذیرفته شده است استفاده گردید.

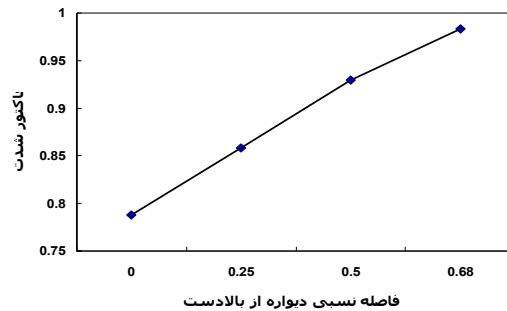


(شکل ۲۲) - مقادیر گرادیان خروجی نسبی در مقابل موقعیت نسبی دیوار آب بند ( خاک غیر همسان)

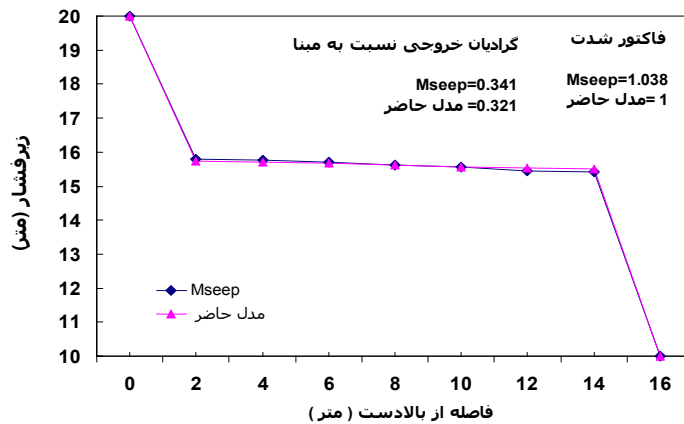
مقادیر فاکتور شدت (نسبت زیر فشار کل به زیر فشار کل حالت میناء) و گرادیان خروجی نسبت به گرادیان خروجی مینا (گرادیان خروجی نسبی) برای وضعیت‌های مختلف احداث دیواره آب بند در زیر سازه در اشکال ۲۱ و ۲۲ نشان داده شده است. نتایج به دست آمده از این نمودارها شبیه نتایج حالت دیواره آب بند منفرد می‌باشد.

### دو دیواره آب بند، یکی در بالادست و دیگری در پایین دست

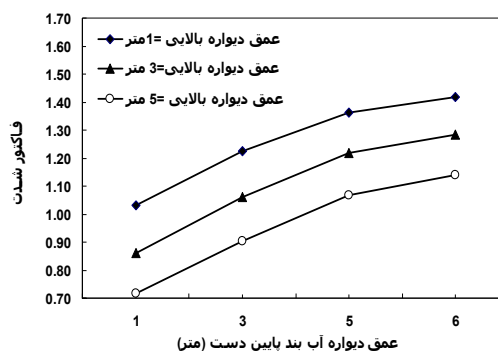
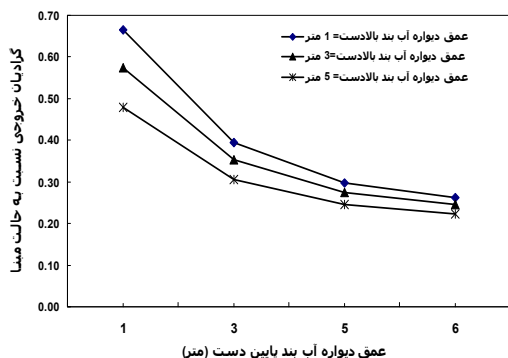
در این حالت دو دیواره آب بند با عمق‌های مختلف یکی در بالادست و دیگری در پایین دست در نظر گرفته شد. برای حالتی که عمق دیواره آب بند بالادست و پایین دست هر دو ۵ متر باشد نتایج به دست آمده از مدل ریاضی با مدل WinMseep مقایسه شد. در جدول ۳ و شکل ۲۳ مقایسه نتایج ارائه شده است که نشان دهنده تطابق بسیار خوب دو مدل می‌باشد. پس از صحت سنجی مدل برای این حالت تأثیر نسبت عمق‌های



(شکل ۲۱) - مقادیر فاکتور شدت در مقابل موقعیت نسبی دیوار آب بند (خاک غیر همسان)



(شکل ۲۳) - مقایسه مقادیر زیرفشار محاسبه شده توسط دو مدل



(شکل ۲۵) - مقایسه گرادیان خروجی نسبت به حالت مبنا برای حالت‌های مختلف عمق دو دیواره آب بند (خاک غیر همسان)

(شکل ۲۴) - مقایسه فاکتور شدت برای حالت‌های مختلف عمق دو دیواره آب بند ( خاک غیر همسان)

(جدول ۳) - مقادیر زیر فشار محاسبه شده (بر حسب متر آب) با مدل حاضر و مدل WinMseep در حالت‌های مختلف ( $K_x \neq K_y$ )

فاصله از بالادست سد (متر)		بدون دیواره آب بند و زهکش		دیواره آب بند منفرد		دو دیواره آب بند با عمق متفاوت	
مدل حاضر		مدل حاضر		مدل حاضر		مدل حاضر	
mseep		mseep		mseep		mseep	
۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰
۲	۱۸/۰۱۹	۱۸/۰۱۹	۱۸/۷۲۵	۱۸/۹۰۴	۱۸/۷۴۵	۱۵/۷۹۸	۱۵/۷۹۸
۴	۱۶/۹۶۷	۱۶/۹۶۷	۱۸/۰۸۲	۱۸/۴۱۵	۱۵/۷۱۹	۱۵/۷۶	۱۵/۷۶
۶	۱۶/۰۹۲	۱۶/۰۹۲	۱۸/۵۷۲	۱۸/۰۴۴	۱۵/۶۷۲	۱۵/۶۹۲	۱۵/۶۹۲
۸	۱۵/۲۶۳	۱۵/۲۶۳	۱۷/۱۱۹	۱۷/۷۴۹	۱۵/۶۱۳	۱۵/۶۰۷	۱۵/۶۰۷
۱۰	۱۴/۴۱۸	۱۴/۴۱۸	۱۶/۶۸۴	۱۷/۵۱۹	۱۵/۵۵۸	۱۵/۵۵۲	۱۵/۵۵۲
۱۲	۱۳/۴۸۹	۱۳/۴۸۹	۱۶/۱۹۹	۱۷/۳۵۹	۱۵/۵۲۰	۱۵/۴۵۴	۱۵/۴۵۴
۱۴	۱۲/۳۲۲	۱۲/۳۲۲	۱۵/۲۸۹	۱۷/۲۷۶	۱۵/۵۰۹	۱۵/۴۱۵	۱۵/۴۱۵
۱۶	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰

نتایج این تحقیق نشان داد که:

- ۱- با احداث یک دیواره آب بند در هر وضعیت مکانی، مقدار گرادیان خروجی نسبت به گرادیان خروجی مبنا (بدون دیوار آب بند) کاهش می‌یابد.
- ۲- بیشترین نیروی زیر فشار و کمترین گرادیان هیدرولیکی خروجی در موقعیتی که دیوار آب بند در پائین دست احداث شود، دیده می‌شود.
- ۳- در شرایط وجود دو پرده آب بند یکی در پاشنه و دیگری در

## منابع

- ۱- پنج سد و یک زهکش در حد فاصل آنها هرچقدر زهکش در فاصله بیشتری از پاشنه احداث شود تأثیر آن در کاهش نیروی زیر فشار کل و گرادیان خروجی بیشتر می‌باشد.
- ۲- علاوه بر این با افزایش طول پرده آب بند بالادست در مقایسه با پرده آب بند پائین دست مقدار گرادیان خروجی کاهش می‌یابد شدت این کاهش برای پرده آب بند پائین دست با طول کوتاه تر مشهود تر می‌باشد.

۱- ابن جلال ر. و شفای بجستان م. ۱۳۸۴. اصول نظری و عملی مکانیک خاک. انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز.  
 ۲- ابول پور ب. ۱۳۷۳. روش های برآورد تراوش، زیر فشار و زیرشویی در سازه های هیدرولیکی با ارایه مدل کامپیوتری. پایان نامه کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، دانشگاه شیراز.  
 ۳- جباری ا. ۱۳۷۶. حل مدل ریاضی سه بعدی جریان دائمی آب در محیط متخلخل ناهمگن ناهمسان با استفاده از روش اجسام محدود و شبکه

- بندی دلخواه. پایان نامه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران. دانشکده فنی، دانشگاه تهران.
- ۴- صدقی اصل م. ۱۳۸۴. اثر موقعیت بهینه پرده آب بند قائم در کاهش نشست و سرعت جریان در زیر سازه های آبی با استفاده از مدل عددی. پنجمین کنفرانس هیدرولیک ایران. دانشگاه کرمان
- ۵- صیادزاده ف. ۱۳۸۶. آنالیز نشست از پی خاک های لایه دار با استفاده از روش المان محدود. ششمین کنفرانس هیدرولیک ایران. دانشگاه شهر کرد.
- ۶- صباغ یزدی س. و بیات ب. ۱۳۸۵. تحلیل تراوش دو بعدی در پی و محاسبه زیر فشار در سدهای بتنی وزنی. هفتمین کنگره بین المللی مهندسی عمران.
- ۷- عابدی کوپایی ج. ۱۳۸۰. بررسی عوامل موثر بر زیر فشار در پایداری سدهای انحرافی به روش تفاضل محدود. پایان نامه کارشناسی ارشد در رشته تاسیسات آبیاری، دانشگاه تربیت مدرس.

8- GeoDelf. 2002. MSeep User Manual – Release, 6.7, P.81.

9- Pakbaz M.S., Dardaei A., and Salahshoor J. 2009. Evaluation of performance of plastic concert cutoff wall in karkheh dam using 3-D Seepage analysis and measurement. *Journal of Applied Sciences*, 9(4):724-730.

10-Versteeg H.K., and Malalasekera W. 1995. An introduction to computational fluid dynamics - The finite volume method. Longman Group Ltd., P, 255

11-Yifeng C., Chuangbing Z., Hong Z. 2008. A numerical solution to seepage problems with complex drainage systems. *Computers and Geotechnics*, 35(3), PP. 383–393.



## Effects of cutoff wall and drain on uplift pressure and exit gradient under hydraulic structure by numerical solution of general equation of fluid flow in soil using finite volume method

R. Ghobadian<sup>1\*</sup> - K. khodaei<sup>2</sup>

### Abstract

Among activities that can be used to prevent piping phenomena and reduce seepage and exit gradient are installation of cutoff wall and drain under hydraulic structures. Hence in this study, to investigating the influence of each mentioned parameter on uplift force and exit gradient a computer model has developed in which general equation of fluid flow into the isotropic and anisotropic soil was solved numerically by Gauss-Seidel method. Verify model, experimental result and result of WinMseep model that is an acceptable model was used. One of the relative advantages of this model is consideration of permeability value for cutoff curtain. The result of this study showed, by construction of one cutoff curtain in any location values of exit gradient relative to basic exit gradient (without cutoff) reduces. Also, maximum uplift force and minimum exit gradient is observed when cutoff curtain is located in toe. For situation with two cutoff walls in toe and heel of dam and one drain in between it is observed that when drain is located at far distance whit respect to heel influence of it on uplift force and exit gradient increases. Additionally with increasing upstream cutoff depth in comparison to downstream cutoff, values of exit gradient decreases and intensity of this decrease for shallow downstream cutoff is more sensible. Distribution of uplift pressure and calculated exit gradient for isotropic and anisotropic condition are very consistences to those are computed by WinMseep model.

**Key words:** Hydraulic structure, Cutoff wall, Uplift pressure, Exit gradient, Finite volume

1, 2- Assistant prof. and MSc. Student, Water Engineering Department, Razi University, Kermanshah  
(\* - Corresponding author Email: rsghodobadian@gmail.com)