

## بررسی تأثیر تابع هدایت هیدرولیکی در تحلیل نشت غیر محصور (مطالعه موردی سد خاکی حسلو)

حجت احمدی<sup>۱\*</sup>، وحید رضوردی نژاد<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۷/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۵/۲۲

### چکیده

در این تحقیق اهمیت به کارگیری توابع نفوذپذیری در تحلیل نشت دائم و غیر دائم (انتقالی) غیر محصور در محیط‌های همگن و غیر همگن بررسی شد. برای این منظور حالات مختلف جریان در محیط‌های همگن و غیر همگن با لحاظ خصوصیات هیدرولیکی مصالح مستخرج از بانک اطلاعاتی خاک‌های غیر اشباع (UNSODA) و به کمک یک مدل کامپیوتری مبتنی بر روش اجزای محدود مطالعه شد. برای اعتبارسنجی نتایج این تحلیل، از داده‌های ابزار دقیق ثبت شده‌ی سد حسلو طی دوره یکساله استفاده گردید. نتایج بررسی‌ها نشان داد که در محیط غیر همگن و سدهای ناحیه‌بندی شده، خصوصیات هیدرولیکی مصالح پایین دست نسبت به مصالح بالادست بر موقعیت سطح نشت مؤثرتر است. هم‌چنین طبق یافته‌های تحقیق، موقعیت سطح نشت در شرایط به کارگیری هدایت هیدرولیکی ثابت نسبت به هدایت هیدرولیکی متغیر در شرایط بالا آمدن سطح آب در مخزن رشد آهسته‌تری داشته و در عین حال در شرایط پایین افتادن سطح آب در مخزن، سرعت زهکشی مصالح بیش‌تر می‌باشد. مقایسه داده‌های واقعی ثبت شده با نتایج مدل نشان می‌دهد که جهت حصول نتایج واقع بینانه لازم است خصوصیات هیدرولیکی مصالح به صورت تابع هدایت هیدرولیکی تعریف گردد یا اینکه حداقل برای مصالح پایین دست این شرایط رعایت شود.

واژه‌های کلیدی: تابع هدایت هیدرولیکی، مصالح، سد خاکی، نشت

### مقدمه

(2005). قابلیت حرکت آب در محیط ناپیوسته خاکی متأثر از تابع هدایت هیدرولیکی است که با توجه به میزان آب منفذی تغییر کرده و با آن رابطه عکس دارد. به عبارت دیگر وابسته به درجه اشباع و یا مقدار مکش خاک می‌باشد. لذا به منظور تحلیل صحیح نشت از بدنه سدهای خاکی لازم است که ناحیه غیر اشباع ایجاد شده در بدنه یک سد خاکی کاملاً مشخص گردد. نقش این ناحیه علاوه بر محاسبه مقدار نشت و طراحی این سازه‌ها و در ارائه بهترین طرح هیدرولیکی به منظور ارائه سطح مقطع مناسب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (Xu et al., 2003). علاوه بر این، به دلیل اینکه خط نشت و یا به عبارت دیگر توزیع فشار آب منفذی نقشی اساسی در پایداری بدنه سد خاکی ایفا می‌کند؛ لذا تغییرات درجه اشباع در بدنه سد خاکی تحت این شرایط تأثیر مستقیم بر ضریب اطمینان پایداری خواهد داشت (Srivastava et al., 2010). آنچه که از تحقیق بر روی نشت از سدهای غیرهمگن با هسته رسی حاصل شده است نشان می‌دهد که به منظور آنالیز نشت ضرورتی بر بررسی نشت از کل بدنه و بخش‌های با نفوذپذیری بالا وجود ندارد و بررسی نشت از هسته به تنهایی کافی می‌باشد به طوری که آنالیز درست نشت در هر دو حالت بایستی نتایج یکسانی ارائه دهد (Balaam., 2005). روش‌های مستقیم و آزمایشگاهی ارائه شده برای تعیین مقدار هدایت هیدرولیکی در

امروزه با پیشرفت تکنولوژی، کاربرد گسترده مدل‌های ریاضی و کامپیوتری در تحلیل مسائل مختلف مهندسی امری ضروری است؛ به طوری که در چند دهه گذشته مدل‌های مختلف کامپیوتری جهت تحلیل و آنالیز مسائل نشت، حرکت آب در محیط‌های متخلخل، انتقال آلودگی‌ها و موارد مشابه توسعه یافته است. با این حال مهم‌ترین محدودیت به کارگیری این مدل‌ها مربوط به تعیین خصوصیات هیدرولیکی محیط و خصوصاً تغییرات رطوبت و به تبع آن تغییرات نفوذپذیری محیط در شرایط غیر اشباع می‌باشد (Ghanbarian-Alavijeh et al., 2010). تحلیل ریاضی مسائل مربوط به حرکت آب در محیط‌های متخلخل با هندسه‌های محصور نسبتاً ساده می‌باشد ولی در هندسه‌های غیر محصور به دلیل تغییرات شدید در نفوذپذیری خاک، تحلیل و ارائه نتایج دقیق بسیار مشکل و پیچیده می‌باشد و به همین دلیل در اکثر کتب و متون علمی مکانیک خاک، تحلیل ریاضی و عددی چنین مسائلی خالی است (Ji et al.,

۱- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه

۲- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه

(Email: [hojjat.a@gmail.com](mailto:hojjat.a@gmail.com))

\*- نویسنده مسئول:

بخشی از هندسه حاکم خواهد بود که در آنجا جریان آب برقرار باشد. به این ترتیب دامنه حل معادله در چنین شرایطی خود جزء مجهولات به حساب می‌آید.

**معادلات حاکم:** معادله حاکم بر جریان آب در محیط متخلخل و نشت در حالت دو بعدی به شکل زیر می‌باشد:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (1)$$

که در آن  $H$  انرژی کل،  $k_x$  هدایت هیدرولیکی در جهت  $x$ ،  $k_y$  هدایت هیدرولیکی در جهت  $y$ ،  $Q$  شار وارد شده از مرزهای محیط،  $\theta$  رطوبت حجمی و  $t$  زمان می‌باشد. مقدار رطوبت حجمی وابسته به تغییرات حالت تنش و خصوصیات فیزیکی خاک است. متغیرهای حالت تنش به صورت دو بخش  $(\sigma - u_a)$  و  $(u_a - u_w)$  بیان می‌گردد که  $\sigma$  تنش کل و  $u_a$  و  $u_w$  به ترتیب فشار هوا و آب منفذی می‌باشد. از آنجائیکه در بخش اشباع یا غیر اشباع از بدنه یک سد خاکی مقدار تنش کل و فشار هوای منفذی ثابت می‌باشد، لذا تغییرات رطوبت حجمی متناسب با تغییرات فشار آب منفذی خواهد بود که این فشار خود بخشی از مقدار انرژی کل ( $H$ ) در معادله (۱) می‌باشد. بدین ترتیب تغییرات رطوبت حجمی به شکل زیر قابل بیان است:

$$\partial \theta = m_w \partial u_w \quad (2)$$

که در رابطه فوق  $m_w$  شیب تغییرات رطوبت حجمی نسبت به تغییرات فشار آب منفذی است. مقدار انرژی کل جریان طبق معادله برنولی و با توجه به سرعت پایین حرکت آب به فرم زیر ساده می‌شود:

$$H = \frac{u_w}{\gamma_w} + y \quad (3)$$

که  $y$  ارتفاع استاتیکی و  $\gamma_w$  وزن مخصوص آب می‌باشد. با ترکیب روابط (۲) و (۳) و جای گذاری آن در رابطه (۱) و با توجه به اینکه ارتفاع استاتیکی هر نقطه مقدار ثابتی دارد، معادله حاکم بر پدیده نشت به شکل زیر تبدیل می‌شود:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = m_w \gamma_w \frac{\partial H}{\partial t} \quad (4)$$

این معادله معمولاً به یکی از روش‌های عددی اجزا و یا اختلاف محدود حل می‌شود. جهت حل معادله در هر گام زمانی، در همه این روش‌ها مقدار  $m_w$  معمولاً با توجه به مقدار فشار آب منفذی شرایط اولیه و یا محاسبه شده از گام قبلی، از روی منحنی مشخصه رطوبتی تعیین می‌گردد. علاوه بر این مقدار نفوذپذیری در بعدهای  $x$  و  $y$  با توجه به منحنی تابع نفوذپذیری به صورت مشابه استخراج می‌گردد.

منحنی مشخصه رطوبتی با آزمایش بر روی نمونه خاک و به کمک دستگاه صفحات فشاری قابل تعیین است با این حال روابط تجربی فیزیکی مختلفی برای تعیین آن پیشنهاد شده است. طبق

مکش‌های مختلف (تابع هدایت هیدرولیکی) بسیار پیچیده بوده و عمدتاً محدود به مکش‌های کوچک می‌باشد (Munoz et al., 2008; Zhang et al., 2011 and Timlin et al., 1996). به‌طور کلی این روش‌ها به دو دسته روش‌های ماندگار و غیرماندگار تقسیم‌بندی می‌شوند که دقت روش‌های ماندگار در تعیین تابع هدایت هیدرولیکی بیش‌تر بوده با این حال بسیار زمان‌بر می‌باشد (Fredlund and Rahardjo., 1993; Zhang et al., 2011). علاوه بر روش‌های مستقیم، روش‌های غیرمستقیم تعیین تابع هدایت هیدرولیکی بر اساس منحنی مشخصه رطوبتی و مقدار رطوبت حجمی خاک ابداع شده است که به دلیل تعیین آسان‌تر این منحنی، کاربرد این روش‌ها در مدل‌های ریاضی حرکت آب در محیط‌های غیر اشباع و تعیین نفوذپذیری غیر اشباع رایج‌تر می‌باشد (Van Genuchten et al., 1991). مدل‌های تعیین نفوذپذیری غیر اشباع بر اساس منحنی مشخصه رطوبتی در دو دسته اصلی شامل مدل‌های رگرسیونی و توزیع داده‌ها (Sang and Sang 2006; Gupta and Larson 1979; Saxton et al., 1986; Arya and paris., 1981; Smetton and Gregory., 1996; Fredlund and Xing., 1994; Green and Corey., 1971; Van Genuchten., 1980). بر این اساس و با توجه به نتایج حاصل از تحقیق‌های محققان متعدد جهان در زمینه خصوصیات هیدرولیکی خاک‌های غیر اشباع، بانک اطلاعات هیدرولیکی غیر اشباع خاک (UNSODA) متشکل از انواع خاک‌های مختلف بر طبق طبقه‌بندی مثلث بافت خاک ارائه شده است (Leij et al., 1996).

در این تحقیق مسئله نشت در محیط‌های غیرهمگن در دو حالت: الف- تابع هدایت هیدرولیکی متغیر (غیر اشباع) و ب- هدایت هیدرولیکی ثابت (اشباع) مورد بررسی قرار گرفته و نتایج به نشت از بدنه سد خاکی ناحیه‌بندی شده بسط داده شد و در ادامه از داده‌های ثبت شده سد خاکی حسنلو، برای اعتبار سنجی نتایج استفاده گردید.

## مواد و روش‌ها

حرکت آب در بدنه سدهای خاکی متأثر از اختلاف انرژی و منافذ موجود در آن بوده که از یک معادله دیفرانسیل با مشتقات جزئی حاصل از دو قانون پیوستگی و اصل بقای جرم تعریف می‌گردد. که با حل معادله حاکم بر اساس هندسه و شرایط مرزی، می‌توان مسیر جریان، مقدار و انرژی آن‌را در هر موقعیت و زمانی مشخص کرد. با این حال در حل معادله حاکم بایستی ضرایب و پارامترهای مربوط به خصوصیات محیط متخلخل به دقت تعیین شود. علاوه بر این در شرایطی که جریان غیر محصور باشد به‌طوری‌که در بخش‌هایی، سطح جریان در تماس با هوا و فشار اتمسفر باشد، معادله حاکم فقط در

### هندسه مسئله

به منظور بررسی تأثیر هدایت هیدرولیکی بخش غیراشباع در محاسبه مقدار نشت و موقعیت آن در محیط‌های همگن و غیرهمگن در شرایط ماندگار و غیرماندگار به اقتباس از کارهای ژری و همکاران و همچنین باردت و توبیتا از یک هندسه ساده شامل یک سد با مقطع مستطیلی همگن و غیر همگن نشان داده شده در شکل ۱ و ۲ استفاده شد (Bardet and Tubita., 2002, Ji et al., 2005). خصوصیات مصالح در سد مدل بر اساس داده‌های پایگاه هیدرولیکی غیر اشباع خاک (UNSODA) مربوط به دو کد ۱۰۲۳ و ۳۰۳۱ به ترتیب به عنوان یک خاک ماسه‌ای با نفوذپذیری بالا (S) و خاک رسی با نفوذپذیری کم (C) استفاده شد (Leij et al., 1996). منحنی دانه‌بندی و خصوصیات هر یک از این خاک‌ها به ترتیب در شکل ۲ و ۳ ارائه شده است.

### اعتبار سنجی مدل

برای بررسی صحت نتایج حاصل از تحلیل عددی و مدل، از داده‌ها و اطلاعات ثبت شده سد خاکی حسنلو واقع در استان آذربایجان غربی استفاده شد. شکل ۱۲ و جدول ۱ به ترتیب مقطع سد و مشخصات مصالح سد حسنلو را نشان می‌دهد. این سد خاکی از نوع ناحیه‌بندی شده و بدون هسته رسی بوده که به دلیل تشکیل شدن از دو نوع مصالح خاکی ریزدانه در بخش بالادست و درشت دانه در بخش پایین‌دست شباهت زیادی به مدل سد مجازی بررسی شده دارد. بدین منظور از داده‌های ثبت شده مربوط به تراز مخزن و خط نشت ثبت شده در پیژومتر واقع در فاصله ۱۱ متر از محور سد طی یک دوره ۱۲ ماهه از کارکرد سد استفاده شد. بدنه سد حسنلو از ۵ ناحیه اصلی متشکل از لایه محافظ بالادست به ضخامت تقریبی ۰/۵ متر، بدنه بالادست با نفوذپذیری کم، لایه فیلتر و زهکش دودکشی پایین دست (در بخش قائم با ضخامت ۰/۳ متر و در بخش افقی ۰/۶ متر)، بدنه درشت دانه پایین دست و پی با نفوذپذیری خیلی کم می‌باشد. با توجه به نفوذپذیری بخش زهکش و فیلتر پایین دست که طبق گزارش طرح که تقریباً برابر بدنه پایین دست می‌باشد و ضخامت کم آن، در تحلیل آنالیزها از خصوصیات هیدرولیکی مصالح بدنه پایین دست برای بخش فیلتر و زهکش افقی استفاده گردید. علاوه بر این ضخامت کم لایه محافظ بالادست (ریپ راپ) و نفوذپذیری بسیار بالای آن تأثیر این بخش در محاسبات لحاظ نگردید. مشخصات هیدرولیکی مصالح سد بر اساس روابط ارائه شده و بر پایه منحنی دانه‌بندی و وزن مخصوص ظاهری اندازه‌گیری شده، به کمک مدل RETC بر پایه روابط ۹ و ۱۰ استخراج شد. به دلیل اشباع بودن

رابطه آریا و پاریس با تقسیم منحنی دانه‌بندی به بخش‌های مختلف، مقدار حجم منافذ خاک تعیین و با توجه به مکش ایجاد شده حجم رطوبت در توده خاک تعیین می‌گردد. بر این اساس مقدار حجم منافذ در هر بخش از منحنی دانه‌بندی به صورت زیر تعریف شده است (Aria and Paris., 1981):

$$V_i = \frac{W_i}{\rho_p} e \quad (5)$$

که در آن:  $V_i$  حجم منافذ در واحد جرم بخش  $i$  منحنی دانه‌بندی،  $W_i$  وزن ذرات جامد در واحد جرم بخش  $i$ ،  $\rho_p$  چگالی ذرات جامد بخش  $i$  و  $e$  تخلخل خاک می‌باشد. با محاسبه مقدار حجم منافذ مقدار رطوبت حجمی به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$\theta_i = \sum_{i=1}^n V_i \rho_p \quad (6)$$

با معلوم بودن مقدار جرم ذرات هر بخش از منحنی دانه‌بندی و فرض کروی بودن ذرات در هر بخش به قطر  $R_i$ ، تعداد ذرات خاک در هر بخش از رابطه زیر قابل تعیین خواهد بود:

$$n_i = \frac{3W_i}{4\pi R_i^3 \rho_p} \quad (7)$$

همچنین شعاع منافذ در هر بخش از رابطه پیشنهادی آریا و پاریس حاصل می‌شود:

$$r_i = R_i \left[ \frac{4en_i^{(1-\alpha)}}{6} \right]^{0.5} \quad (8)$$

در رابطه فوق  $\alpha$  ضریب شکل بوده که به صورت تجربی مقدار آن ۱/۳۸ توصیه شده است. با توجه به شعاع منافذ و نیروی کاپیلاری مقدار مکش ماتریک در هر بخش به شکل زیر تعیین می‌گردد:

$$\Psi_i = \frac{2T \cos \beta}{\rho_w g r_i} \quad (9)$$

در رابطه فوق  $\beta$  زاویه تماس آب و ذرات جامد (برابر با صفر) و  $T$  نیروی کشش سطحی برابر با ۷۲/۸ دین بر سانتی‌متر باشد. بدین ترتیب برای هر بخش با معلوم بودن مقدار مکش و رطوبت حجمی، منحنی مشخصه تعیین می‌گردد. با معلوم بودن منحنی نگهداشت رطوبتی، براساس رابطه ون گنوختن و همکاران، هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک در مکش‌های مختلف بر اساس مقدار هدایت هیدرولیکی اشباع خاک حاصل می‌شود (Van Genuchten., 1991):

$$k_{\theta} = k_s \frac{[1 - (\alpha \Psi^{(n-1)})(1 + (a \Psi^n)^{-m})]^2}{\left[ (\alpha \Psi^n)^{\frac{m}{2}} \right]} \quad (10)$$

در رابطه فوق  $k_{\theta}$  هدایت هیدرولیکی غیر اشباع،  $\alpha$ ،  $n$  و  $m$  ضرایب ثابت که از روی منحنی مشخصه رطوبتی تعیین می‌شود.  $\Psi$  مقدار مکش ماتریک می‌باشد.

اشباع خاک شیب منحنی نشت ملایم‌تری نسبت به شرایط به‌کارگیری تابع هدایت هیدرولیکی دارد. مقدار نشت محاسبه شده برای این دو حالت در جدول ۲ ارائه شده است. مقایسه دو مقدار نشت کل نشان‌دهنده عبور جریان نشت بیش‌تری در حالت هدایت هیدرولیکی ثابت نسبت به حالت تابع هدایت هیدرولیکی است. همچنین مقایسه مقدار جریان عبوری از بالا و زیر خط نشت برای این شرایط نشان داد که در حالت به‌کارگیری هدایت هیدرولیکی ثابت، بخش قابل ملاحظه‌ی جریان عبوری از بخش بالای خط نشت می‌باشد در حالیکه در حالت بکارگیری تابع هدایت هیدرولیکی، جریان ناچیزی از بالای خط نشت عبور می‌کند که به دلیل غیر اشباع بودن مصالح بالای خط نشت نتیجه حاصل منطقی می‌باشد. این شرایط باعث می‌گردد که جریان عبوری متمرکز بر قسمت اشباع و زیر سطح ایستابی بوده و در نتیجه ضخامت لایه اشباع کاهش یافته و سطح عبوری جریان محدود شده و در نهایت دبی محاسبه شده در این شرایط نسبت به حالت استفاده از هدایت هیدرولیکی ثابت کم‌تر باشد.

#### محیط همگن، نشت غیر دائم

به منظور بررسی تأثیر به‌کارگیری هدایت هیدرولیکی ثابت به جای تابع هدایت هیدرولیکی در آنالیز نشت در شرایط ناپایدار، مدل‌سازی نشت از سد همگن با مقطع مستطیلی در دو حالت افزایش و کاهش سطح نشت انجام گردید. شکل ۵، نتیجه بررسی عددی برای نشت ناپایدار را در حالتی که سطح آب در بالادست روند افزایشی داشته را نشان می‌دهد. در این بررسی شرایط مرزی بالادست بدین صورت بوده که تراز آب در بالادست با سرعت ثابت در مدت یک ماه از سطح صفر به سطح تراز ۲۰ متر افزایش یافته و سپس ثابت مانده است. به منظور مقایسه واضح تأثیر هدایت هیدرولیکی اشباع ثابت و متغیر در این حالت، چندین گام زمانی مساوی از این آنالیز ارائه شده است. منحنی‌های سطح نشت محاسبه شده، نشان می‌دهد که با افزایش زمان، سطح نشت و ضخامت بخش اشباع به ترتیب به سمت بالا و پایین دست گسترش پیدا می‌کند. مقایسه این رفتار برای دو حالت هدایت هیدرولیکی ثابت و متغیر نشان می‌دهد که افزایش ارتفاع سطح نشت در بخش‌های بالادست در حالت به‌کارگیری هدایت هیدرولیکی متغیر سریع‌تر می‌باشد با این حال به سمت پایین دست در زمان‌های مساوی از زمان شروع نشت، بخش کم‌تری اشباع می‌شود. این موضوع نشان می‌دهد که در حالت بکارگیری هدایت هیدرولیکی ثابت مقدار فشار آب منفذی در بالادست نسبت به حالت استفاده از هدایت هیدرولیکی متغیر کم‌تر بوده در حالی که در پایین دست، عکس این حالت اتفاق می‌افتد.

دائمی پی‌سد، تغییرات مکش در این بخش از مصالح، قابل ملاحظه نبوده و به همین منظور مقدار هدایت هیدرولیکی ثابت و برابر با مقدار اشباع، برای این بخش از مصالح استفاده شد. برای ارزیابی صحت نتایج، داده‌های مشاهده شده در پی‌زومتر سد حسنلو با نتایج مدل بر اساس حالات مختلف به‌کارگیری توابع هدایت هیدرولیکی مورد مقایسه قرار گرفت بر این اساس از دو شاخص ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و شاخص ناش-سانتکلایف (Nash-Sutcliffe NSE)، استفاده شد.

$$RMSE = n^{-1} \left( \sum_{i=1}^n (y_i^{obs} - y_i^{sim})^2 \right) \quad (11)$$

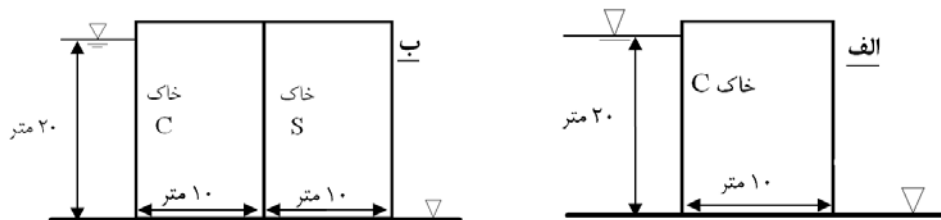
$$NSE = 1 - \left[ \sum_{i=1}^n (y_i^{obs} - y_i^{sim})^2 \right] / \left[ \sum_{i=1}^n (y_i^{obs} - y_{mean}^{obs})^2 \right] \quad (12)$$

که  $y_i^{obs}$  داده‌های مشاهده شده،  $y_i^{sim}$  و  $y_{mean}^{obs}$  داده‌های شبیه‌سازی و متوسط داده‌های مشاهده شده است. همچنین  $n$  تعداد داده‌های مورد مقایسه می‌باشد. شاخص ناش-سوتکلایف یک ضریب نرمال شده آماری می‌باشد که میزان انطباق داده‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی را ارزیابی می‌کند. دامنه تغییرات این ضریب بین ۱ و  $-\infty$  بوده به‌طوری‌که ۱ بیش‌ترین و بهترین انطباق را نشان می‌دهد و با کاهش مقدار این ضریب، دقت مدل هم کاهش پیدا می‌کند و نتایج مدل تا زمانی قابل قبول است که مقدار این ضریب بیش‌تر از صفر باشد (Moriasi et al., 2007).

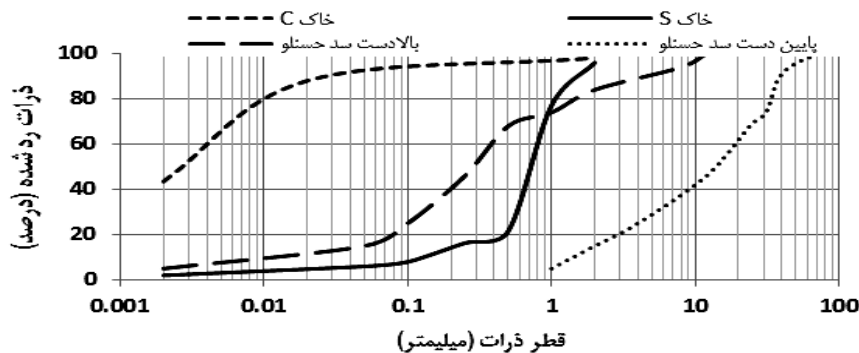
## نتایج و بحث

### محیط همگن، نشت دائم

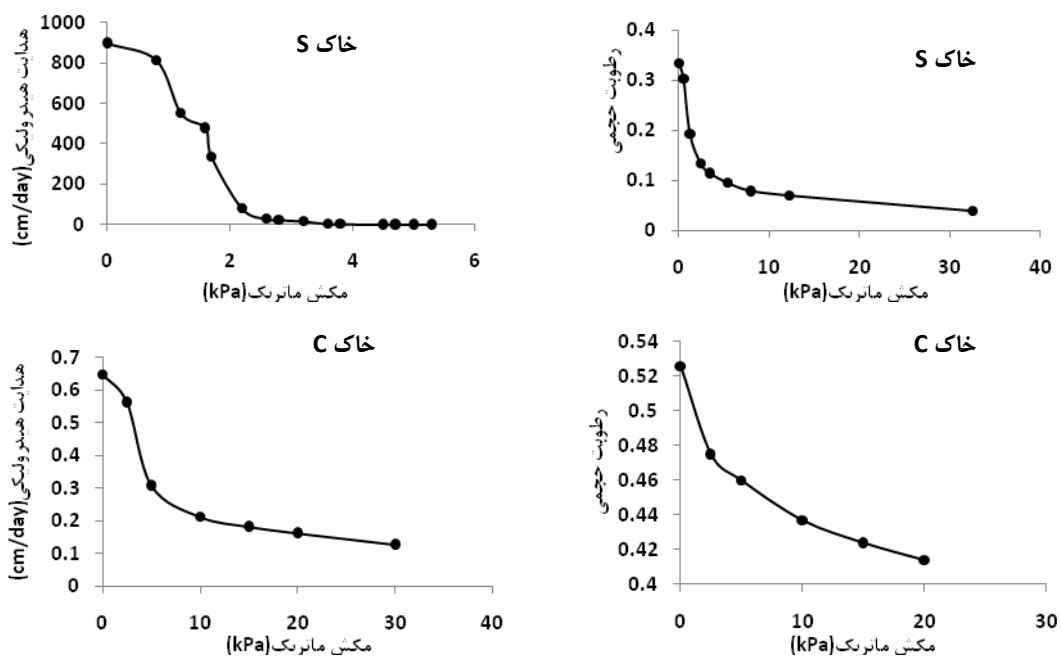
شکل ۴ خط نشت مربوط به نشت آب از سد مستطیلی همگن (با مشخصات هیدرولیکی ارائه شده در شکل ۳) را برای دو حالت مختلف هدایت هیدرولیکی اشباع (ثابت) و تابع هدایت هیدرولیکی (متغیر) در شرایط نشت دائم نشان می‌دهد. با توجه به این شکل خط نشت حاصل از تحلیل نشت برای حالت به‌کارگیری هدایت هیدرولیکی ثابت و متغیر اندکی متفاوت است. به‌طوری‌که در حالت هدایت هیدرولیکی متغیر، خط نشت در نیمه بالادست از بدنه دیوار کمی بالاتر از خط نشت حالت هدایت هیدرولیکی ثابت است. در مقابل به سمت پایین دست، خط نشت مربوط به حالت هدایت هیدرولیکی ثابت، بالاتر از حالت متغیر است. با توجه به ابعاد هندسی مساله بررسی شده سطح نشت در حالت متغیر حدود ۱۰ درصد (۱/۵ متر) کم‌تر از حالت تابع هدایت هیدرولیکی ثابت می‌باشد. البته در اینجا به دلیل عدم وجود داده‌های واقعی در مورد دقت این دو خط نشت و سطح نشت نمی‌توان قضاوت نمود با این حال به‌کارگیری هدایت هیدرولیکی ثابت به ازای هدایت هیدرولیکی



شکل ۱- هندسه سد مستطیلی بکار رفته در تحلیل نشست به همراه شرایط مرزی در حالت نشست دائم. الف: محیط همگن، ب: محیط غیر همگن



شکل ۲- منحنی دانه بندی مصالح استفاده شده در مطالعه حاضر



شکل ۳- خصوصیات هیدرولیکی مصالح استفاده شده در مدل سازی نشست در محیط همگن و غیر همگن سد مستطیلی

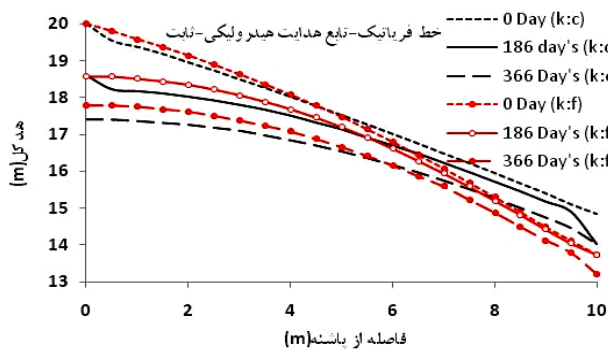
جدول ۱- مشخصات بدنه و مصالح سد خاکی حسنلو

نوع سد	طول تاج (متر)	ارتفاع (متر)	عرض تاج (متر)	ضخامت پی (متر)	ضخامت پی (متر)	هدایت هیدرولیکی اشباع (سانتی متر بر روز)
غیر همگن بدون هسته	۵۲۷۰	۱۰/۷۵	۷	۱۷	بدنه بالادست	۱۷/۵
					بدنه پایین دست	۸۷/۵
						۶/۶

هیدرولیکی ثابت و متغیر نشان می‌دهد که می‌تواند بر آنالیزهای پایداری نیز تأثیر قابل ملاحظه‌ای داشته باشد.

### محیط غیر همگن

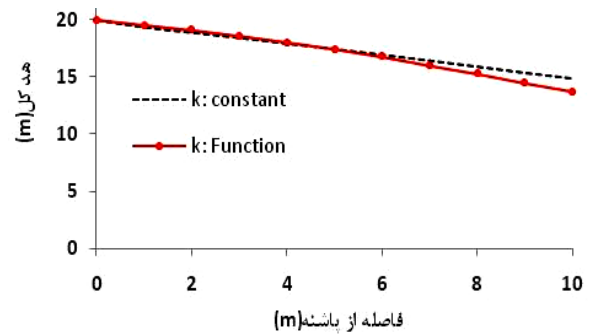
جهت مطالعه تأثیر هدایت هیدرولیکی ثابت و متغیر در محیط‌های غیرهمگن بر پدیده نشت، آنالیزهای مشابه محیط همگن انجام شد. هندسه مقاطع مطالعه شده در شکل ۱ نشان داده شده است. به‌طوریکه در بالادست یک لایه خاک ریزدانه با مشخصات همان خاک لایه همگن و یک لایه خاک درشت دانه به‌عنوان بدنه پایین دست انتخاب گردید. آنالیزهای این بخش در دو حالت دائم و غیردائم به صورت افزایش و کاهش ارتفاع سطح آب انجام یافت.



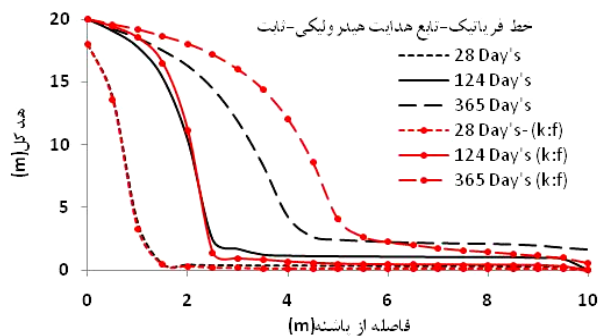
شکل ۴- تغییرات سطح نشت در حالت جریان غیر دائم در سد همگن مستطیلی در حالت پایین افتادگی سطح آب برای دو حالت هدایت هیدرولیکی ثابت و غیر ثابت

### جریان نشت دائم

شکل ۷، نتایج آنالیز نشت دائم با شرایط مرزی نشان داده شده در شکل ۱ را نشان می‌دهد. برای این حالت با ترکیب حالات مختلف به‌کارگیری هدایت هیدرولیکی ثابت و متغیر برای بدنه بالادست و پایین دست، چهار حالت متفاوت بررسی شد. با توجه به نتایج حاصله از به‌کارگیری هدایت هیدرولیکی ثابت برای بالادست و پایین دست، ارتفاع سطح نشت در این حالت، در کم‌ترین مقدار در بین چهار حالت مختلف می‌باشد. در این حالت سطح نشت به صورت یک خط راست در بدنه بالادست بدست آمده است که با توجه به منحنی سهمی شکل سطح نشت، به نظر غیر منطقی می‌باشد. در حالت به‌کارگیری هدایت هیدرولیکی ثابت برای پایین‌دست و متغیر برای بالادست، منحنی نشت در بدنه بالادست به سمت بالا کشیده شده و شکل سهمی پیدا می‌کند. در حالت به‌کارگیری هدایت هیدرولیکی ثابت



شکل ۵- تغییرات خط نشت در نشت غیردائم در سد همگن در حالت هدایت هیدرولیکی ثابت و متغیر



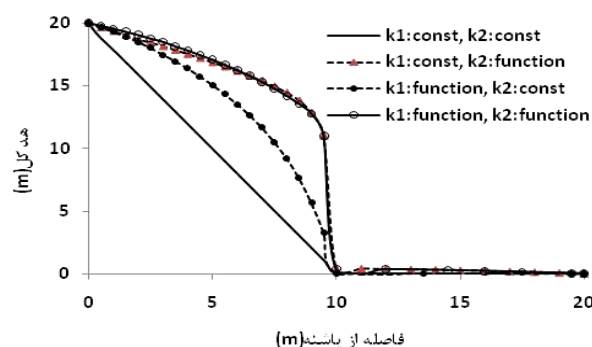
شکل ۶- تغییرات سطح نشت در حالت جریان غیر دائم در سد همگن مستطیلی در حالت پایین افتادگی سطح آب برای دو حالت هدایت هیدرولیکی ثابت و غیر ثابت

### حالت کاهش سطح آب

برای بررسی حالت کاهش سطح آب و پایین افتادگی آب بالادست که حالت دیگری از نشت غیر دائم را سبب می‌شود، آنالیز نشت با شرایط مرزی بالادست برابر با ۲۰ متر شروع و بر این اساس آنالیز نشت دائم به‌منظور ایجاد شرایط اولیه انجام شد. در ادامه سطح آب در بالادست با سرعت ثابت در مدت یک ماه به سطح صفر کاهش داده شد. در ادامه آنالیزهای غیر دائم با این شرایط با استفاده از هدایت هیدرولیکی ثابت و متغیر انجام گرفت. جهت بررسی و مقایسه بهتر تأثیر دو حالت مختلف به‌کارگیری هدایت هیدرولیکی، شرایط اولیه هر دو حالت یکسان و بر اساس منحنی نشت حاصل از هدایت هیدرولیکی متغیر انتخاب گردید. شکل ۶ سه گام زمانی متفاوت از این آنالیز را نشان می‌دهد. نتایج حاصل از این حالت نیز مشابه با حالت افزایش سطح آب بوده به‌طوری‌که آهنگ پایین افتادن خط نشت در بالادست برای هدایت هیدرولیکی ثابت سریع‌تر بوده و به‌عبارت دیگر زهکشی بخش بالادست با سرعت بیش‌تری صورت می‌گیرد درحالی‌که برای نیمه پایین دست بدنه عکس این حالت اتفاق می‌افتد. نتایج این قسمت علاوه بر مقدار نشت عبوری از بدنه، تفاوت قابل ملاحظه‌ای توزیع فشار آب منفذی را در دو حالت هدایت

برای بالادست و متغیر برای پایین‌دست، منحنی مربوط به خط نشت به سمت بالا کشیده می‌شود و در نهایت در حالتی که برای بالادست و پایین‌دست هدایت هیدرولیکی متغیر به کار گرفته می‌شود شکل منحنی نشت در این حالت با اندکی اختلاف با حالتی که برای بالادست هدایت هیدرولیکی ثابت و برای پایین دست متغیر، تقریباً منطبق بر منحنی نشت حاصل از اعمال هدایت هیدرولیکی متغیر ارائه شده در شکل ۴ می‌باشد. به دلیل هدایت هیدرولیکی بسیار بالای بدنه پایین دست (شکل ۴)، هر چهار منحنی نشت در این لایه تقریباً بر روی هم منطبق شده‌اند. با توجه به اینکه شکل خط نشت در حالت به‌کارگیری هدایت هیدرولیکی متغیر در حالت لایه همگن و غیر همگن برای لایه اول از محیط غیرهمگن و کل محیط همگن یکسان است می‌توان صحت به‌کارگیری هدایت هیدرولیکی متغیر را در آنالیز نشت تایید کرد. البته اختلاف بین منحنی خط نشت در حالت به‌کارگیری هدایت هیدرولیکی ثابت برای بالادست و هدایت هیدرولیکی متغیر برای پایین دست تقریباً یکسان است.

با مقایسه مقادیر جریان عبوری از بالا و زیر خط نشت در جدول ۲، مشاهده می‌شود که در حالت هدایت هیدرولیکی متغیر برای هر دو ناحیه، مقدار جریان عبوری از پایین خط نشت بیش‌ترین مقدار را نسبت به سه حالت دیگر دارد که نشان‌دهنده رفتار مشابه با شرایط همگن دارد. هم‌چنین در حالت به‌کارگیری هدایت هیدرولیکی متغیر برای پایین‌دست، نتایج نسبتاً مشابهی نسبت به دو حالت دیگر دارد.



شکل ۷- آنالیز نشت دائم از بدنه غیر همگن در حالات مختلف هدایت هیدرولیکی ثابت و متغیر برای مصالح

#### آنالیز نشت غیر دائم - افزایش سطح آب

به منظور بررسی نشت غیر دائم در محیط غیر همگن، آنالیزها در دو حالت افزایش و کاهش سطح آب انجام گرفت. در حالت افزایش سطح آب، تراز آب در بالا دست با آهنگ ثابت از صفر در مدت یک ماه به ۲۰ متر افزایش یافته و سپس ثابت باقی می‌ماند. نتیجه این آنالیزها در شکل ۸ نشان داده شده است.

مقایسه سطح نشت در این آنالیزها با توجه به ترکیب حالات مختلف به‌کارگیری هدایت هیدرولیکی ثابت و متغیر برای لایه بالادست و پایین دست نشان می‌دهد که شکل منحنی‌های نشت تحلیل یافته به دو فرم کلی می‌باشد. به‌طوری‌که شکل منحنی نشت در حالت به‌کارگیری هدایت هیدرولیکی ثابت برای پایین دست و هدایت هیدرولیکی ثابت یا متغیر برای پایین دست و هدایت هیدرولیکی ثابت (شکل ۱۰ الف و ج) بسیار به هم شبیه می‌باشد. هم‌چنین در حالت به‌کارگیری هدایت هیدرولیکی متغیر برای پایین دست و هدایت هیدرولیکی ثابت یا متغیر برای بالادست نتایج تحلیل بسیار مشابه می‌باشد. به‌عنوان اولین نتیجه گیری منطقی، شکل منحنی نشت در محیط غیرهمگن دولایه به خصوصیات هیدرولیکی مصالح پایین‌دست بستگی دارد. با توجه به نتایج ارائه شده، به دلیل هدایت هیدرولیکی بیش‌تر مصالح لایه دوم، اختلاف منحنی نشت در این لایه برای هر چهار حالت مختلف تقریباً یکسان است. با این حال به علت عدم وجود نتایج آزمایشگاهی، بحث در خصوص میزان دقت هر یک از منحنی‌ها غیر منطقی می‌باشد. علاوه بر این، نکته دیگری که از این بررسی‌ها و شکل ۱۰ قابل استخراج است این است که در حالت به‌کارگیری هدایت هیدرولیکی متغیر در زمان‌های مساوی پس از شروع جریان، منطقه اشباع بیش‌تری نسبت به حالت استفاده از هدایت هیدرولیکی ثابت در ناحیه بالادست مشاهده می‌شود و این از دید توسعه فشار آب منفذی و پارامترهای وابسته می‌تواند بسیار قابل ملاحظه باشد.

#### آنالیز نشت غیر دائم، کاهش سطح آب

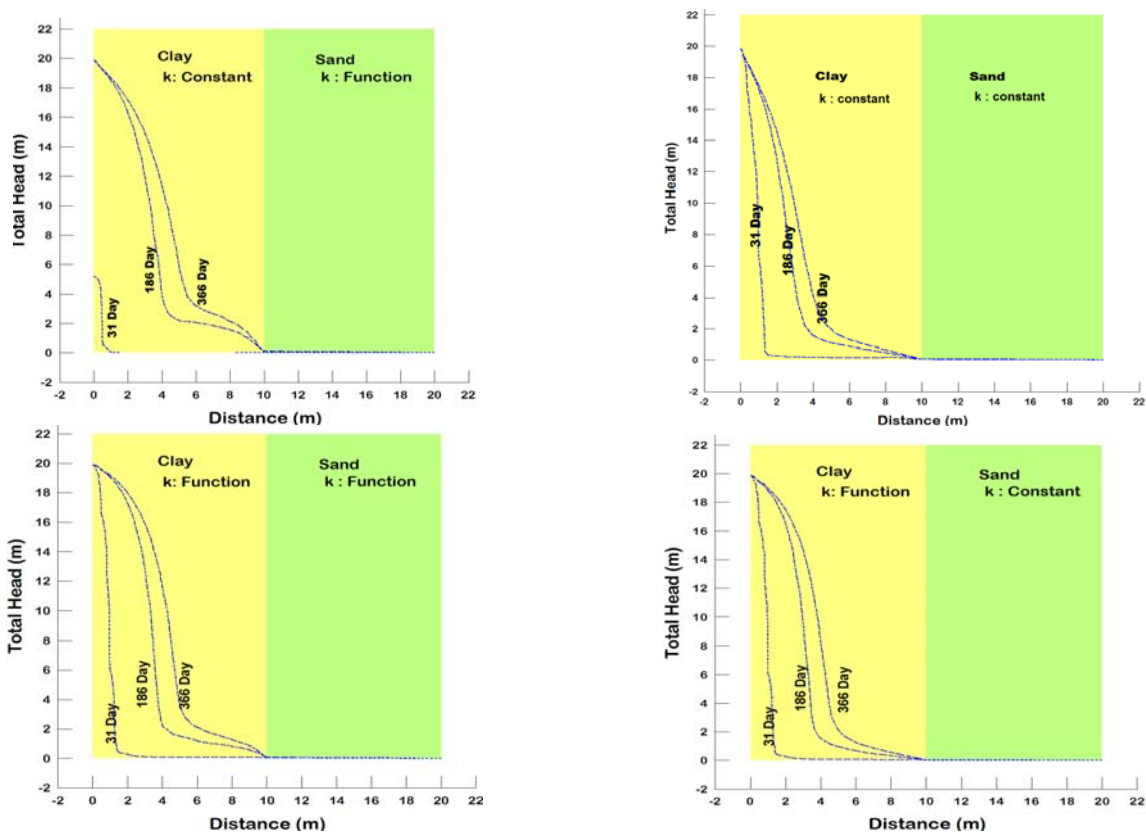
برای بررسی شرایط نشت در حالت کاهش سطح آب، شرایط اولیه بر اساس آنالیز نشت دائم حالت هدایت هیدرولیکی متغیر برای بالادست و پایین دست انتخاب شد (شکل ۹). نتایج این بخش از آنالیزها در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همان‌طوری‌که در شکل‌ها مشخص است سرعت زهکشی لایه بالادست در حالت به‌کارگیری هدایت هیدرولیکی ثابت برای هر دو لایه، بیش‌ترین مقدار را دارا می‌باشد (شکل ۹-الف) که با انتخاب هدایت هیدرولیکی متغیر برای بالادست و هدایت هیدرولیکی ثابت برای پایین دست، سرعت پایین افتادن سطح آب در لایه بالادست اندکی کاهش پیدا می‌کند (شکل ۹-ج) که این کاهش سرعت با انتخاب هدایت هیدرولیکی متغیر و ثابت به ترتیب برای پایین دست و بالادست بیش‌تر مشاهده می‌گردد و نهایتاً کم‌ترین سرعت پایین افتادگی خط نشت زمانی مشاهده می‌شود که برای هر دو لایه هدایت هیدرولیکی متغیر انتخاب شود. در این حالت از آنالیز نشت نیز مشابه با حالت افزایش سطح آب شکل منحنی نشت وابستگی بیش‌تری به حالت هدایت هیدرولیکی

زیر خط نشت دارد. در حقیقت، در ناحیه غیر اشباع به دلیل وجود حباب‌های هوا در فضای بین ذرات، عملاً بخش قابل ملاحظه مسیر جریان مسدود و یا محدود شده و در نتیجه این بخش تأثیر کمی در انتقال جریان خواهد داشت لذا نتایج حاصل از تحلیل نشت با به-کارگیری تابع هدایت هیدرولیکی که خصوصیات واقعی قابلیت انتقال آب در محیط متخلخل را بیان می‌کند عملاً باید به واقعیت نزدیک‌تر باشد.

پایین دست دارد. به‌طوریکه وقتی هدایت هیدرولیکی پایین‌دست متغیر در نظر گرفته می‌شود سرعت زهکشی لایه بالادست بدون توجه به هدایت هیدرولیکی ثابت یا متغیر آن شدیداً کاهش می‌یابد. هرچند که انتظار می‌رود زهکشی این لایه از بخش بالادست که منتهی به مرز خارجی است سریع‌تر صورت بگیرد. ولی به‌کارگیری هدایت هیدرولیکی ثابت در پایین دست باعث می‌شود که از بالای خط نشت نیز بخش قابل ملاحظه‌ای از جریان عبور کند. یعنی ناحیه غیر اشباع بالای خط نشت از همان مقدار هدایت هیدرولیکی برخوردار است که

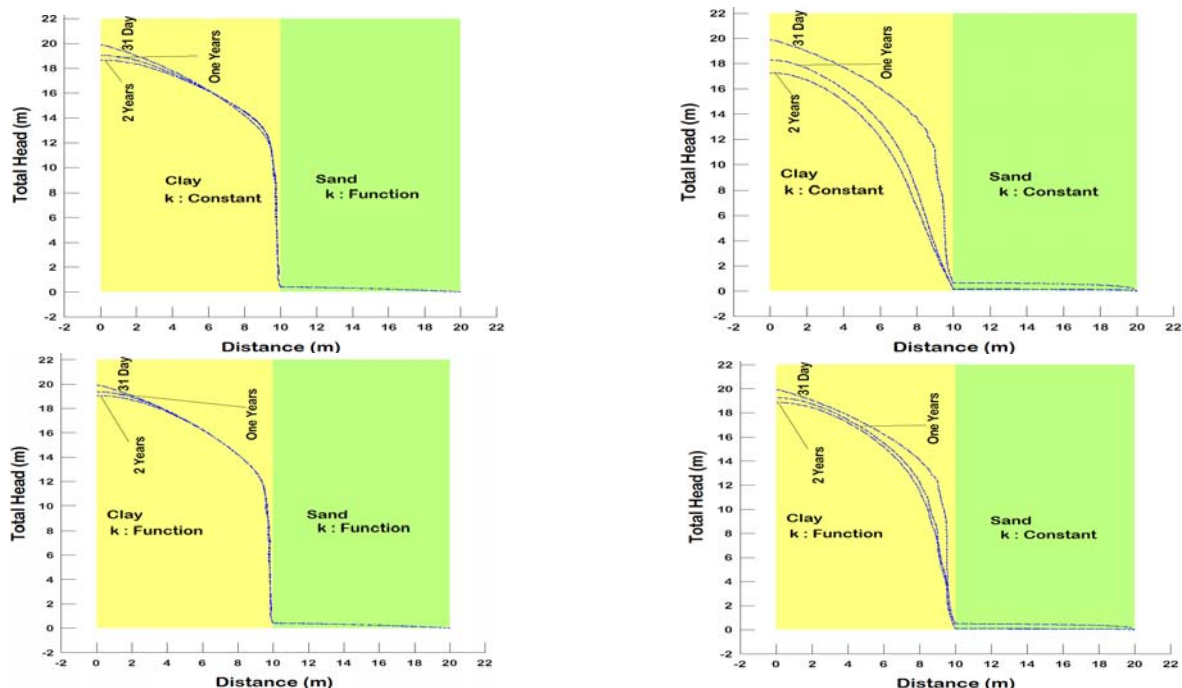
جدول ۲- مقدار جریان عبوری از بدنه سد همگن و غیر همگن مستطیلی در حالت نشت دائم به همراه مقدار جریان عبوری از بخش اشباع و غیر اشباع (بالا و زیر خط نشت)

نوع سد- هدایت هیدرولیکی	جریان کل (m <sup>3</sup> /day)	جریان غیر اشباع	جریان اشباع (m <sup>3</sup> /day)	درصد جریان غیر اشباع	درصد جریان اشباع
همگن- ثابت	۰/۱۳۷	۰/۰۰۷	۰/۱۳۰	۹۵/۱۶۴	۴/۸۳۶
همگن- متغیر	۰/۱۳۴	۰/۰۰۳	۰/۱۳۰	۹۷/۴۶۳	۲/۵۳۷
ناهمگن- بالادست و پایین دست ثابت	۰/۲۸۱	۰/۲۱	۰/۰۷۱	۲۵/۲۲۰	۷۴/۷۸
ناهمگن- بالادست ثابت و پایین دست	۰/۱۴۷	۰/۰۱۵	۰/۱۳۲	۹۰/۰۸۷	۹/۹۱۳
ناهمگن- بالادست متغیر و پایین دست	۰/۱۶۷	۰/۰۶۳	۰/۱۰۳	۶۲/۰۴۶	۳۷/۹۵۴
ناهمگن- بالادست و پایین دست متغیر	۰/۱۳۹	۰/۰۰۹	۰/۱۳۰	۹۳/۲۹۳	۶/۷۰۷



شکل ۸- آنالیز نشت غیر دائم محیط غیر همگن در حالت افزایش سطح آب در شرایط به‌کارگیری هدایت هیدرولیکی ثابت و متغیر



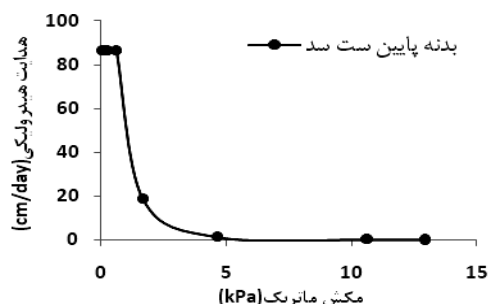
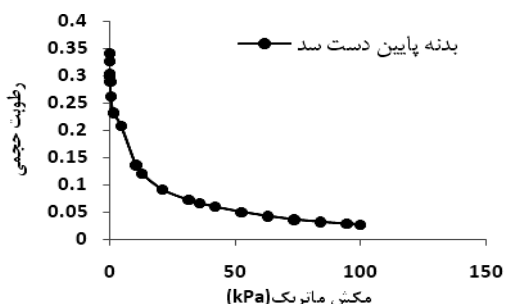
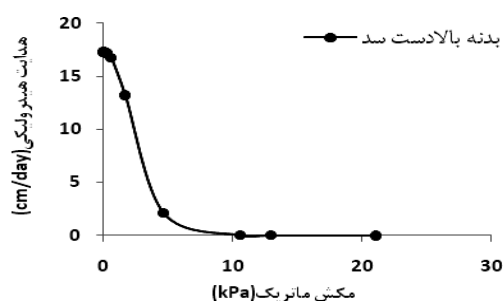
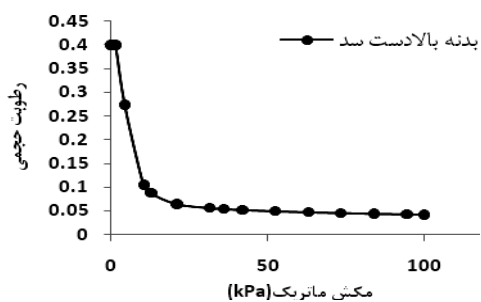


شکل ۹- آنالیز نشست غیر دائم محیط غیر همگن در حالت کاهش سطح آب در شرایط به کارگیری هدایت هیدرولیکی ثابت و متغیر

### مطالعه موردی - سد خاکی حسنلو

سد حسنلو از نظر شکل مقطع و همچنین نوع مصالح شباهت بسیار زیادی با مدل سد مستطیلی غیر همگن بررسی شده دارد. برای بررسی شرایط جریان در این سازه توابع هدایت هیدرولیکی و منحنی مشخصه با توجه به هدایت هیدرولیکی اشباع بر اساس منحنی دانه بندی مصالح و روابط ارائه شده استخراج گردید که در شکل ۱۰

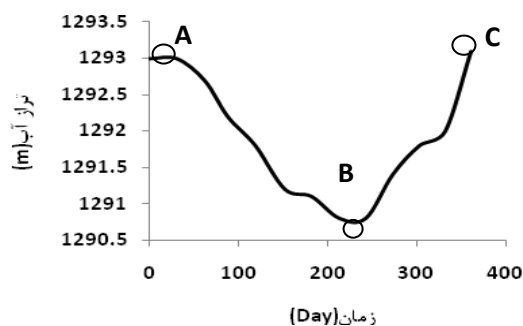
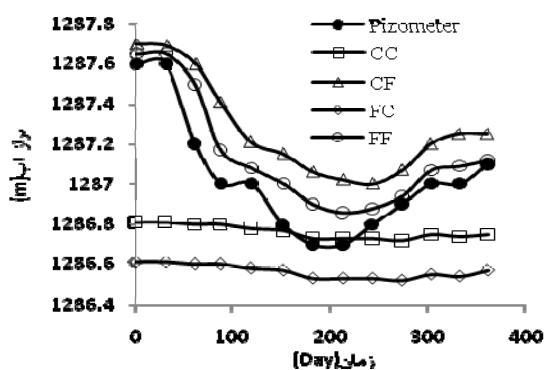
خصوصیات این مصالح ارائه شده است. شرایط مرزی هیدرولیکی بر اساس تغییرات تراز سطح مخزن ثبت شده در طول سال ۱۳۸۱ اعمال گردید (شکل ۱۱ الف)). جهت بررسی دقت نتایج حاصل از داده های مربوط به دو سری پیزومتر تعبیه شده در فاصله ۱۱ متر از محور سد در بدنه پایین دست استفاده گردید.



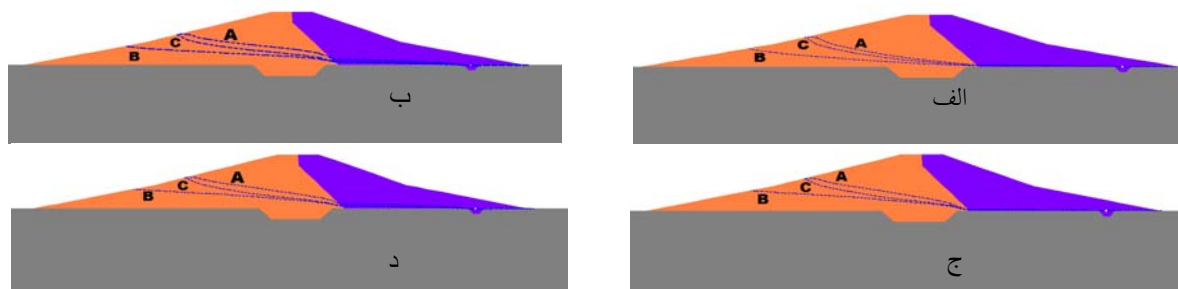
شکل ۱۰- منحنی هدایت هیدرولیکی و منحنی نگهداشت رطوبتی محاسبه شده برای مصالح بدنه سد خاکی حسنلو

محور سد را به همراه نوسانات خط نشت حاصل از آنالیزهای مدل را نشان می‌دهد. داده‌های واقعی با نتایج آنالیز حالت به‌کارگیری هدایت هیدرولیکی متغیر برای بالادست و پایین‌دست بیش‌ترین تطابق و منحنی تراز مربوط به حالت به‌کارگیری حالت هدایت هیدرولیکی ثابت برای پایین‌دست و بالادست کمترین تطابق را دارد. از دو حالت دیگر بررسی شده، در حالت به‌کارگیری هدایت هیدرولیکی متغیر و ثابت به ریب برای پایین‌دست و بالادست تطابق نتایج حاصله با داده‌های ثبت شده بیش‌تر است. آنالیز مربوط به RMSE و NSE داده‌های واقعی و ثبت شده و نتایج تحلیل مدل این را تأیید می‌کند (جدول ۳).

برای اعمال شرایط اولیه آنالیز نشت دائم با تراز آب مخزن در حدود ۱۲۹۳ متر انجام شد. شکل ۱۲، نتیجه آنالیزهای صورت گرفته را برای ۳ گام زمانی مختلف نشان می‌دهد. همان‌طوری که مشخص است تغییرات مشاهده شده در منحنی‌های نشت، مشابه با منحنی‌های سطح نشت مربوط به مقاطع مستطیلی بررسی شده می‌باشد و الگوهای نشت ایجاد شده بر اساس هدایت هیدرولیکی ثابت و متغیر متفاوت می‌باشد. به‌طوریکه در حالت هدایت هیدرولیکی متغیر برای بدنه‌ی پایین‌دست، خطوط نشت مربوط به زمان‌های مختلف نسبت حالت به‌کارگیری هدایت هیدرولیکی ثابت، در تراز بالاتری قرار دارند. شکل ۱۱ (ب) تراز ثبت شده در پیزومتر واقع در فاصله ۱۱ متری از



شکل ۱۱- تغییرات تراز سطح آب در مخزن سد حسنلو (الف) از اول و تراز آب ثبت شده و محاسبه شده در پیزومتر واقع در فاصله ۱۱ متر از محور سد فروردین تا ۲۷ اسفند سال ۱۳۸۱



شکل ۱۲- خط نشت محاسبه شده در سد حسنلو. (A) شرایط اولیه سطح آب، (B) در زمان حداقل تراز سطح آب مخزن پس از ۲۴۵ روز، (C) انتهای دوره پس از ۳۶۵ روز (حالات A، B و C بر اساس شکل ۱۱)

جدول ۳- میانگین مربعات خطا سطح تراز آب حاصل از آنالیز مدل نسبت به داده‌های ثبت شده در پیزومترهای A و B

NSE	RMSE	نوع هدایت هیدرولیکی	
		بالادست	پایین دست
-۰/۷۴	۰/۱۵	۰/۱۵	ثابت
-۲/۵۸	۰/۳۵	۰/۳۵	ثابت
-۰/۰۸	۰/۰۸	۰/۰۸	متغیر
۰/۷۵	۰/۰۲	۰/۰۲	متغیر

## نتیجه گیری

Fredlund, D.G and Rahardjo, H. 1993. Soil mechanic for unsaturated soil. John wiley & sons Inc.

Fredlund, D.G and Xing, A. 1994. Equations for the soil-water characteristic curve. Canadian Geotechnical Journal. 31 (4): 521-532.

Ghanbarian-Alavijeh, B., Liaghat, A., Huang, G.H and Van Genuchten, M.Th. 2010. Estimation of the van genuchten soil water retention properties from soil textural data. Pedosphere, 20 (4): 456-465.

Green, R.F and Corey, J.C. 1971. Calculation of hydraulic conductivity: a further evaluation of some predictive methods. Soil Sci. Soc. Am. Proceeding. 35: 3-8.

Gupta, S.C and Larson, W.E. 1979. Estimating soil water retention characteristics from particle size distribution, organic matter percent and bulk density. Water resource research. 15: 1633-1635.

Ji, Ch.N., Wang, Y.Z and Shi, Y. 2005. Application of modified EP method in steady seepage analysis. Computers and Geotechnics. 32 (1): 27-35.

Krahn, J. 2004. Seepage modeling with Seep/w: an engineering methodology. Geo-Slope International Ltd. Canada.

Leij, F.J., Alves, W.J., Van Genuchten, M.Th., and Williams, J.R. 1996. Unsaturated soil hydraulic database, UNSODA 1.0 User's manual. EPA Report 600/R96/095. USEPA, Ada

Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Harmel, R.D and Veith, T.L. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulation. American society of agriculture and biological engineers. 50 (3): 885-900.

Munoz, J.J., Delaure, E and De Gennaro, V. 2008. Experimental determination of unsaturated hydraulic conductivity in compacted silt. Unsaturated soils: Advances and in geo-engineering. Taylor and Francis group. London.

Sang Il, H., and Sang Il, Ch. 2006. Use of a logarithmic distribution model for estimation soil water retention curves from particle-size distribution data. Journal of Hydrology. 323: 325-334.

Saxton, K.E., Rawls, W.J., Romberger, J.S and papendik, R.I. 1986. Estimating generalized soil-water characteristics from texture. Soil Sci. Soc. Am. Journal. 50 (4): 1031-1036.

Srivastava, A., Sivakumar Babu, G.L and Halder, S. 2010. Influence of spatial variability of permeability on steady state seepage and slope stability analysis. Engineering Geology. 110 (3-4): 93-101.

در این تحقیق با بررسی تأثیر هدایت هیدرولیکی بر خصوصیات نشت آب از بدنه سدهای خاکی نتایج زیر قابل بیان است:

۱- در حالتی که نشت دائم از محیط همگن صورت گیرد، به کارگیری هدایت هیدرولیکی ثابت (هدایت هیدرولیکی اشباع) باعث خواهد شد که ضخامت لایه اشباع بیش تر از حالتی باشد که هدایت هیدرولیکی به صورت تابعی از مقدار مکش ماتریکس خاک یا درصدی از رطوبت اشباع خاک بیان می گردد.

۲- در حالت به کارگیری هدایت هیدرولیکی ثابت، بخش قابل توجهی از جریان از بخش فوقانی خط نشت عبور می کند در صورتی که در حالت به کارگیری هدایت هیدرولیکی متغیر جریان عبوری از بخش غیراشباع بسیار کم و جزئی می باشد.

۳- در حالت جریان انتقالی و در شرایط به کارگیری هدایت هیدرولیکی ثابت سرعت اشباع شدن لایه در حالت افزایش سطح آب در مرزها و سرعت زهکشی در حالت کاهش سطح آب بیش تر از حالتی خواهد بود که هدایت هیدرولیکی به صورت تابعی از مقدار مکش ماتریکس خاک بیان می گردد. به دلیل اهمیت موقعیت خط نشت و به تبع آن فشار آب حفره‌ای بر تنش مؤثر در سدهای خاکی، این نتایج بر روی آنالیزهای پایداری بدنه سدهای خاکی می تواند تأثیر گذار باشد.

۴- در حالتی که هدایت هیدرولیکی برای حالت مصالح غیر همگن به صورت تابع بیان گردد دقت نتایج تحلیل عددی تطابق بهتری با داده‌های واقعی خواهد داشت. در این حالت لایه‌ی خصوصیات مصالح پایین دست تأثیر قابل توجه در صحت نتایج خواهد داشت به طوری که جهت حصول نتایج واقع بینانه لازم است مصالح لایه پایین دست در جهت جریان بصورت تابع هدایت هیدرولیکی بیان گردد. در صورتیکه در تحلیل نشت از بدنه سدهای خاکی غیر همگن مقدار ثابتی بر هدایت هیدرولیکی مصالح اتخاذ شود طبق نتایج مدل ناش- ساتکلایف نتایج ممکن است فاقد اعتبار باشد.

## منابع

Arya, L.M and Paris, J.F. 1981. A physicoempirical model to predict the soil moisture characteristic for particle-size distribution and bulk density data. Soil Soil Science Society of America Journal. 45: 1023-1030.

Balaam, N. 2005. Finite element seepage analysis: FESEEP. Center for Geotechnical Research University of Sydney.

Bardet, J.P., Tobita, T. 2002 A practical method for solving free-surface seepage problems. Computers and Geotechnics. 29: 451-475.

- Van Genuchten, F.J., Leij, F.J. and Yates, S.R. 1991. The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils. U.S. Salinity: Laboratory. Agricultural research service. California. USA.
- Xu, Y.Q., Unami, K. and Kawachi, T. 2003. Optimal hydraulic design of earth dam cross section using saturated-unsaturated seepage flow model. *Advance in Water Resource*. 26 (1): 1-7.
- Zhang, Y.L., Chen, R. and Li, J.H. 2011. Evaluation the accuracy of unsaturated hydraulic conductivity determined by instantaneous profile method. *Unsaturated Soils: Theory and Practice*. Proceeding. Kasetsart University, Thailand.
- Smettem, K.R.J. and Gregory, P.J. 1996. The relation between soil water retention and particle-size distribution parameters for some predominantly sandy western Australian soils. *Aust. J. Soil Research*. 34 (5): 695-708.
- Timlin, D.J., Pachepsky, Ya.A., Acook, B. and whisler, F. 1996. Indirect estimation of soil hydraulic properties to predict soybean yield using GLYSIM. *Agricultural system*. 52 (2/3). pp. 331-353.
- Van Genuchten, M.Th. 1980. A closed form equation for predicting hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil science society of America journal*. 44: 892-898.

## Investigation on the Effects of Hydraulic Conductivity Function in Unconfined Seepage Analysis (Case study: Hassanlu Earth Dam)

H. Ahmadi<sup>1\*</sup>, V.Rezaverdinejad<sup>2</sup>

Received: Oct, 12, 2013

Accepted: Aug. 13, 2014

### Abstract

In this research the emphasis of the application of hydraulic conductivity function in seepage analysis through in homogenous and nonhomogeneous medium was investigated. For this aim, different forms of flow in mentioned mediums were analyzed via a finite element numeric model based on hydraulic properties were selected from unsaturated soils database (UNSODA). In order to validate the results annual recorded data in Hassanlu earth dam was used. The results showed, in nonhomogeneous medium as well as zoned earth dams, the role of downstream material is more significant. Furthermore, the phreatic line in the state of employing constant conductivity in instead in conductivity function rises rapidly in the conditions of rising water lever at the boundaries while in drawdown it drain faster. Comparison between filed data and model results also showed to get realistic results employing of hydraulic conductivity in the form function is essential at least for downstream materials.

**Key words:** Hydraulic Conductivity Function, Material, Earth Dam, Seepage

---

1- Assistant Professor, Department of Water Engineering , Faculty of Agriculture, Urmia University

2- Assistant Professor, Department of Water Engineering , Faculty of Agriculture, Urmia University

(\* - Corresponding Author Email: [hojjat.a@gmail.com](mailto:hojjat.a@gmail.com))