

تعیین معادلات صریح طول زهکش افقی در سدهای خاکی همگن با استفاده از خواص سهمی مبنا و مقایسه با روش ترسیمی کاساگرانده (مطالعه بر روی سد خاکی گلستان (۱))

امین کرمی مقدم، دانشجوی کارشناسی ارشد سازه های هیدرولیکی، دانشگاه شهید باهنر کرمان.*

سمانه حاجی مهدی، دانشجوی کارشناسی ارشد سازه های آبی، دانشگاه شهید باهنر کرمان.**

* تلفن: ۰۹۱۶۶۱۳۵۶۵۳، پست الکترونیکی: amin_km_at@yahoo.com

** تلفن: ۰۹۱۱۳۷۷۳۳۹۰، پست الکترونیکی: S_hajimashhadi@yahoo.com

چکیده:

هنگامیکه گرادیان هیدرولیکی در قسمت تراوش آب از پایین دست سد از شیب بدنه پایاب تجاوز نماید، باعث شسته شدن خاک بدنه سد می شود. به طوری که با تشکیل تونل، باعث فرسایش درونی یا رگاب در سد می شود. که نهایتاً شکست سد را در پی خواهد داشت. چنانچه در این شرایط از یک زهکش افقی استفاده شود، خطر فرسایش درونی تا حد زیادی کاهش می یابد. این نوع زهکش ها بوسیله یک یا چند طبقه فیلتر به خاک بدنه سد متصل گشته و تمامی زه درون بدنه و قمست عمده زه پی را به طرف بیرون سد هدایت می کنند. در این مقاله با در نظر گرفتن خط زه در بدنه سد، و با استفاده از ویژگیهای سهمی و یک خط راست، معادلات صریح مربوط به طراحی طول زهکش افقی بدست آمده اند. سپس با در دست داشتن مشخصات سد گلستان (۱)، طول زهکش افقی این سد یک بار از طریق معادلات به دست آمده و بار دیگر از طریق روش گرافیکی کاساگرانده برآورده شده و نهایتاً حاصل این دو روش با هم مقایسه شده اند. نتیجه حالی از این بود که مقادیر به دست آمده از هر دو روش به هم نزدیک بوده و استفاده از معادلات صریح می تواند به عنوان مبنایی جهت کنترل صحت نتایج به دست آمده از روش ترسیمی کاساگرانده که نیاز به مهارت و دقت بالایی دارد، باشد.

کلید واژه ها: تراوش، فرسایش درونی، زهکش افقی، کاساگرانده

۱- مقدمه:

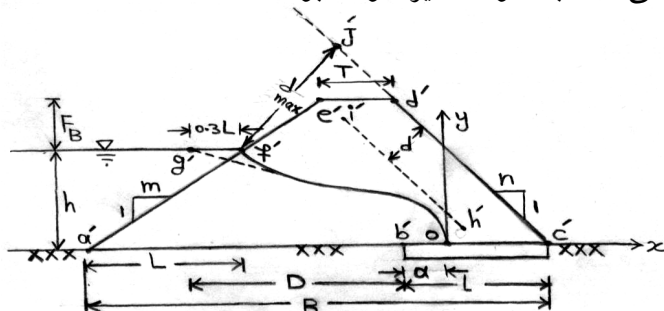
سدهای خاکی، عموماً از مواد در دسترس همان منطقه که از نظر اقتصادی نیز مقرون به صرفه باشد، ساخته می شوند. این مواد بایستی به اندازه کافی غیر قابل نفوذ بوده تا درمقابل نفوذ آب به عنوان یک حصار و مانع عمل نمایند. سدهای خاکی همگن، سدهایی هستند که جهت احداث آنها از یک نوع مصالح استفاده می شود. در این سدها، چون قسمت عمده سد از زه اشباع می شود و دامنه پایاب نیز تحت تأثیر زه می باشد، لازم است که شیب دامنه ها، خیلی کم در نظر گرفته شوند تا دامنه پایاب در برابر زه و دامنه سراب در یک تخلیه سریع مقاوم باشد. در اغلب سدهای خاکی، شیب بالا دست از ۱:۲ تا ۱:۴ (افقی: عمودی) و شیب پایین دست از ۱:۲ تا ۱:۳ می باشد. اگر در این گونه سدها، هیچ گونه

تکنیک زهکشی به کار برده نشود، ممکن است دامنه پایین دست، در اثر زه اشباع شود. از این رو قرار دادن زهکش افقی یا پنجه سنگی در پایاب، یا ترکیبی از این دو، از روشهایی هستند که به منظور کنترل زه و پایداری بیشتر سد، به کار برده می شوند. وجود زهکش ها همراه با فیلتر نه تنها موجب هدایت زه و گردآوری و تخلیه آب به مجاری پیش بینی شده می گردد، بلکه در مواردی که منطقه های ضعیف احتمالی در اثر گرادیان هیدرولیکی آب برای شسته شدن و پوک شدن مستعد هستند، وجود یک فیلتر مناسب از این پدیده جلوگیری کرده و از پیدایش پدیده Piping ممانعت می کند. مواردی که تکانهای حاصل از زلزله با نشست های نامساوی، سبب ایجاد شکافهایی در جسم سد گردد و آب بتواند با سرعت و دبی زیاد و پیش بینی نشده ای از آن ترکها جریان یابد، وجود فیلتر در تمام مواردی که دو لایه با دانه بندی متفاوت در کنار یکدیگر قرار دارند، به ویژه در طرفین مغزه سد، ضروری است. موقعیت مکانی خط زه، پایداری سد خاکی را با ایجاد پتانسیل Piping، گرادیان هیدرولیکی اضافی، لجنی کردن و نرم کردن توده خاک، تحت تأثیر قرار می دهد. زمانی که سدها از خاکهایی با دانه بندی خوب تشکیل می شوند، این امکان وجود دارد که هنگامیکه حداقل طول زهکش افقی پایین دست محاسبه می شود، صعود مویینگی نیز در نظر گرفته شود. اگرچه، ارتفاع مکش در ماتریکس خاک بالای سهمی در بدنه سد، همراه با صعود مویینگی، پایداری شیب پایین دست را تحت تأثیر قرار می دهد، ولیکن، زمانی که شیب پایین دست را قطع کند، فشار از مقدار منفی (مکش) به فشار اتمسفر تغییر یافته و باعث نشست آب در پایین دست سد شده که سد را به سمت شکستن آن راهبری می کند. بنابراین خط زه نبایستی شیب پایین دست را قطع نماید.

۲- تعیین معادلات طول زهکشی افقی در شرایط همسان:

مطابق شکل (۱)، اگر سد خاکی همگن $a'b'c'd'e'f'a'$ را روی پایه غیر قابل نفوذ $a'c'$ و با زهکش افقی $b'c'$ به طول l با شیب بدنه بالاست $1:m$ و شیب بدنه پایین دست $1:n$ در نظر بگیریم. سط آزاد خط زه از یک سهمی (موسوم به سهمی مبنای کازونی) تبعیت کرده که با گذشتن از نقاط o و g' ($0.3L$) از محل تقاطع سطح آب با خط شیب بدنه بالا دست (سد)، در بالا دست زهکش متمرکز می شود. مطابق

شکل (۱)، معادله سهمی og' به صورت زیر خواهد بود:



شکل (۱): مقطع سد خاکی همگن

$$y^2 = -4ax \quad (۱)$$

با جایگزینی نقطه g' به مختصات $[h, -(D+a)]$ در معادله (۱) داریم:

$$a = (\sqrt{D^2 + h^2} - D) / 2 \quad (۲)$$

بنابراین:

$$y^2 = -2(\sqrt{D^2 + h^2} - D) / x \quad (۳)$$

سطح شیب پایین دست، $c'd'$ دارای شیب $M = -\frac{1}{n}$ بوده و محور x ها را در فاصله زیر از پایین دست سد قطع می کند:

$$x = l - a = l - (\sqrt{D^2 + h^2} - D) / 2 \quad (۴)$$

لذا:

$$y = -\frac{x}{n} + \frac{1}{n} \left[l - (\sqrt{D^2 + h^2} - D) / 2 \right] \quad (۵)$$

مطابق شکل (۱)، جهت تعیین فاصله خط زه از سطح شیب دار پایین دست که به پوشش شیب پایین دست موسوم می باشد، خط $h'i'$ به فاصله d و موازی با آن ترسیم شده است. در این صورت معادله خط $h'i'$ موازی خط $c'd'$ و به فاصله d از آن به صورت زیر خواهد بود:

$$y = -\frac{x}{n} + \frac{1}{n} \left[L - (\sqrt{D^2 + h^2} - D) / 2 - d\sqrt{1+n^2} \right] \quad (۶)$$

این خط موازی اگر در شرایط زیر صدق کند، مماس بر سهمی خط زه خواهد بود:

$$a = Mc \quad (۷)$$

در اینجا، مقدار a با استفاده از معادله (۲) محاسبه شده، مقدار M ، معادل شیب خط $h'i'$ و برابر $-\frac{1}{n}$ ، همچنین C ، برابر است با فاصله تقاطعی محور y از خط $h'i'$ که به صورت زیر تعریف می شود:

$$C = \left[l - (\sqrt{D^2 + h^2} - D) / 2 - d\sqrt{1+n^2} \right] / n \quad (۸)$$

با جایگزینی این مقادیر در معادله (۷):

$$-(\sqrt{D^2 + h^2} - D) / 2 = -\frac{1}{n} \left[l - (\sqrt{D^2 + h^2} - D) / 2 - d\sqrt{1+n^2} \right] / n \quad (۹)$$

بنابراین:

$$d = \frac{1}{\sqrt{1+n^2}} - \frac{\sqrt{1+n^2}}{2} (\sqrt{D^2 + h^2} - D) \quad (۱۰)$$

مطابق شکل (۱)، با استفاده از ویژگیهای هندسی مقطع سد و سهمی مبنا:

$$D = B - l - 0.7mh \quad (۱۱)$$

$$B = [(h + F_B) \times (m + n) + T] \quad (۱۲)$$

بنابراین:

$$D = 0.3mh + nh + F_B(m + n) + T - 1 \quad (13)$$

با جایگزینی این مقادیر در معادله (۱۰):

$$(14)$$

$$d = \frac{1}{\sqrt{1+n^2}} - \frac{\sqrt{1+n^2}}{2} \left\{ \sqrt{[0.3mh + nh + F_B(m + n) + T - l]^2 + h^2} - [0.3mh + nh + F_B(m + n) + T - l] \right\}$$

معادله (۱۴) یک رابطه صریح برای پوشش سطح شیب دار پایین دست می باشد. با تعاریف زیر، معادله (۱۴) بی بعد می شود:

$$d_* = \frac{d}{h} \quad (15a) \quad F_{B*} = \frac{F_B}{h} \quad (15b) \quad T_* = \frac{T}{h} \quad (15c) \quad l_* = \frac{l}{h} \quad (15d)$$

با تقسیم نمودن معادله (۱۴) بر h و با جایگزینی معادلات (۱۵a) تا (۱۵d)، داریم:

$$(16)$$

$$d_* = \frac{l_*}{\sqrt{1+n^2}} - \frac{\sqrt{1+n^2}}{2} \left\{ \sqrt{[0.3m + n + F_{B*}(m + n) + T_* - l_*]^2 + 1} - [0.3m + n + F_{B*}(m + n) + T_* - l_*] \right\}$$

همچنین جهت محاسبه حداکثر پوشش سطح شیب دار پایین دست، خط $f'J'$ را از نقطه تقاطع تراز سطح آب با شیب بدنه بالا دست (f')، بر سطح شیبدار پایین دست، یعنی خط $c'd'j'$ عمود رسم می کنیم. طول عمود از نقطه f' به مختصات $[-(a + D - 0.3L), h]$ تا خط $c'd'j'$ برابر است با:

$$(17)$$

$$d_{\max} = \frac{n}{\sqrt{1+n^2}} \left\{ \frac{1}{n} [nh + F_B(m + n) + T - l + (\sqrt{D^2 + h^2} - D)/2] - h + \frac{1}{n} [l - (\sqrt{D^2 + h^2} - D)/2] \right\}$$

بعد از ساده کردن:

$$d_{\max} = \frac{[F_B(m + n) + T]}{\sqrt{1+n^2}} \quad (18)$$

حال، مجدداً با نوشتن معادله (۱۱) به فرم زیر داریم:

$$\sqrt{D^2 + h^2} = \frac{2l}{(1+n^2)} - \frac{2d}{\sqrt{1+n^2}} + D \quad (19)$$

با به توان دو رساندن دو طرف معادله و جایگذاری مقدار D از معادله (۱۳) و ساده کردن:

$$n^2 l^2 - l \left\{ d \sqrt{1+n^2} (n^2 - 1) + (1+n^2) [0.3mh + nh + F_B(m + n) + T] \right\} + \left\{ d(1+n^2)^{\frac{3}{2}} [0.3mh + nh + F_B(m + n) + T] - d^2(1+n^2) + 0.25(1+n^2)^2 h^2 \right\} = 0 \quad (20)$$

و با حل این معادله درجه دوم داریم:

$$l = \frac{1+n^2}{2n^2} (0.3mh + nh + F_B(m+n) + T + \frac{n^2-1}{\sqrt{1+n^2}} d - \sqrt{[0.3mh + nh + F_B(m+n) + T - d\sqrt{1+n^2}]^2 - n^2 h^2} \quad (21)$$

همچنین، حداقل طول زهکش افقی پایین دست ($l_{\min}$) که می تواند خط زه را در بدنه سد نگه دارد، با مساوی صفر قرار دادن مقدار d در معادله (۲۱)، بدست می آید:

$$l_{\min} = \frac{1+n^2}{2n^2} \left\{ 0.3mh + nh + F_B(m+n) + T - \sqrt{[0.3mh + nh + F_B(m+n) + T]^2 - n^2 h^2} \right\} \quad (22)$$

طول زهکش افقی پایین دست، نباید از طول محاسبه شده در بالا کمتر باشد، به عبارتی دیگر، خط نشت شیب پایین دست را در منطقه اشباع قطع خواهد کرد که ممکن است سبب لجنی شدن یا پدیده piping شود. حداکثر طول مؤثر زهکش افقی نیز، مشابهاً از ترکیب معادلات (۱۸) و (۲۱) محاسبه می شود:

$$l_{\max}^* = F_{B^*}(m+n) + T_* + \frac{1+n^2}{2n^2} \left[0.3m + n - \sqrt{(0.3m+n)^2 - n^2} \right] \quad (23)$$

معادله (۲۳)، شکل بی بعد حداکثر طول زهکش افقی پایین دست می باشد. با توجه به اینکه فیلترها گران قیمت هستند، بنابراین طراحی طول زهکش افقی پایین دست بایستی در محدوده بین $l_{\min}$ و $l_{\max}$ باشد.

۳- تعیین معادلات طول زهکش افقی در شرایط غیر همسان:

در ساختار یک سد خاکی، هنگامی که غلتکها، خاکریزها را متراکم می کنند، نفوذ پذیری افقی، تمایل دارد که از نفوذپذیری عمودی بزرگتر عمل نماید. هنگامیکه تفاوت این دو افزایش می یابد، عملکرد زهکش افقی در پایین آوردن خط زه، کاهش می یابد. در خاکریزهای متراکم شده و در رس های عادی تحکیم یافته، نسبت نفوذ پذیری افقی k_x به نفوذ پذیری قائم k_y ، تمایل دارد که بزرگتر از ۲ تا ۱۰ شود. متناظراً در یک مقطع غیر همسان تغییر شکل یافته به مقطع همسان، معادله لاپلاس معتبر بوده به طوری که اگر برای یک مقطع غیر همسان، نسبت مقیاس (λ) به صورت زیر تعریف شود: (۲۴) $\lambda = \sqrt{ky/kx}$

اجزای هندسی مقطع تغییر شکل یافته به شرایط همسان نیز به صورت زیر تعریف می شوند:

$$m_T = \lambda m \quad (25a) \quad n_T = \lambda n \quad (25b) \quad T_T = \lambda T \quad (25c)$$

$$L_T = \lambda L \quad (25d) \quad F_{B_T} = F_B \quad (25e) \quad h_T = h \quad (25f)$$

$$d_T = \lambda d \sqrt{\frac{1+n^2}{1+\lambda^2 n^2}} \quad (25g)$$

اگر معادلات (۲۵a) تا (۲۵g) را در روابط محاسبه d ، $d_{\max}$ ، l ، $l_{\min}$ ، $l_{\max}$ در شرایط همسان، جایگزین نموده و به h تقسیم نماییم، مقادیر بی بعد پارامترهای ذکر شده، در شرایط غیر همسان به دست می آیند:

$$d_* = \frac{1_*}{\sqrt{1+n^2}} - \frac{1+\lambda^2 n^2}{2\sqrt{1+n^2}} \left\{ \sqrt{[0.3m+n+F_{B^*}(m+n)+T_*-l_*]^2 + \lambda^{-2}} - [0.3m+n+F_{B^*}(m+n)+T_*-l_*] \right\} \quad (26)$$

$$d_{\max}^* = \frac{[F_{B^*}(m+n) + T_*]}{\sqrt{1+n^2}} \quad (27)$$

$$(28)$$

$$L_* = \frac{1+\lambda^2 n^2}{2\lambda^2 n^2} (0.3m+n+F_{B^*}(m+n)+T_* + \frac{\lambda^2 n^2 - 1}{1+\lambda^2 n^2} \sqrt{1+n^2} d_* - \sqrt{[0.3m+n+F_{B^*}(m+n)+T_* - d_* \sqrt{1+\lambda^2 n^2}]^2 - n^2})$$

$$l_{\min}^* = \frac{1+\lambda^2 n^2}{2\lambda^2 n^2} \left\{ 0.3m+n+F_{B^*}(m+n)+T_* - \sqrt{[0.3m+n+F_{B^*}(m+n)+T_*]^2 - n^2} \right\} \quad (29)$$

$$l_{\max}^* = F_{B^*}(m+n)+T_* + \frac{1+\lambda^2 n^2}{2\lambda^2 n^2} \left[0.3m+n - \sqrt{(0.3m+n)^2 - n^2} \right] \quad (30)$$

۴- محاسبه طول زهکش افقی سد گلستان (۱):

m= شیب جانبی بالا دست سد

n= شیب جانبی پایین دست سد

Kx= نفوذپذیری افقی مواد سد = $2/5 \times 10^{-5}$ Cm/s

Ky= نفوذپذیری قائم مواد سد = 10^{-6} Cm/s

$$\lambda = 0/1$$

T= عرض تاج = 10m

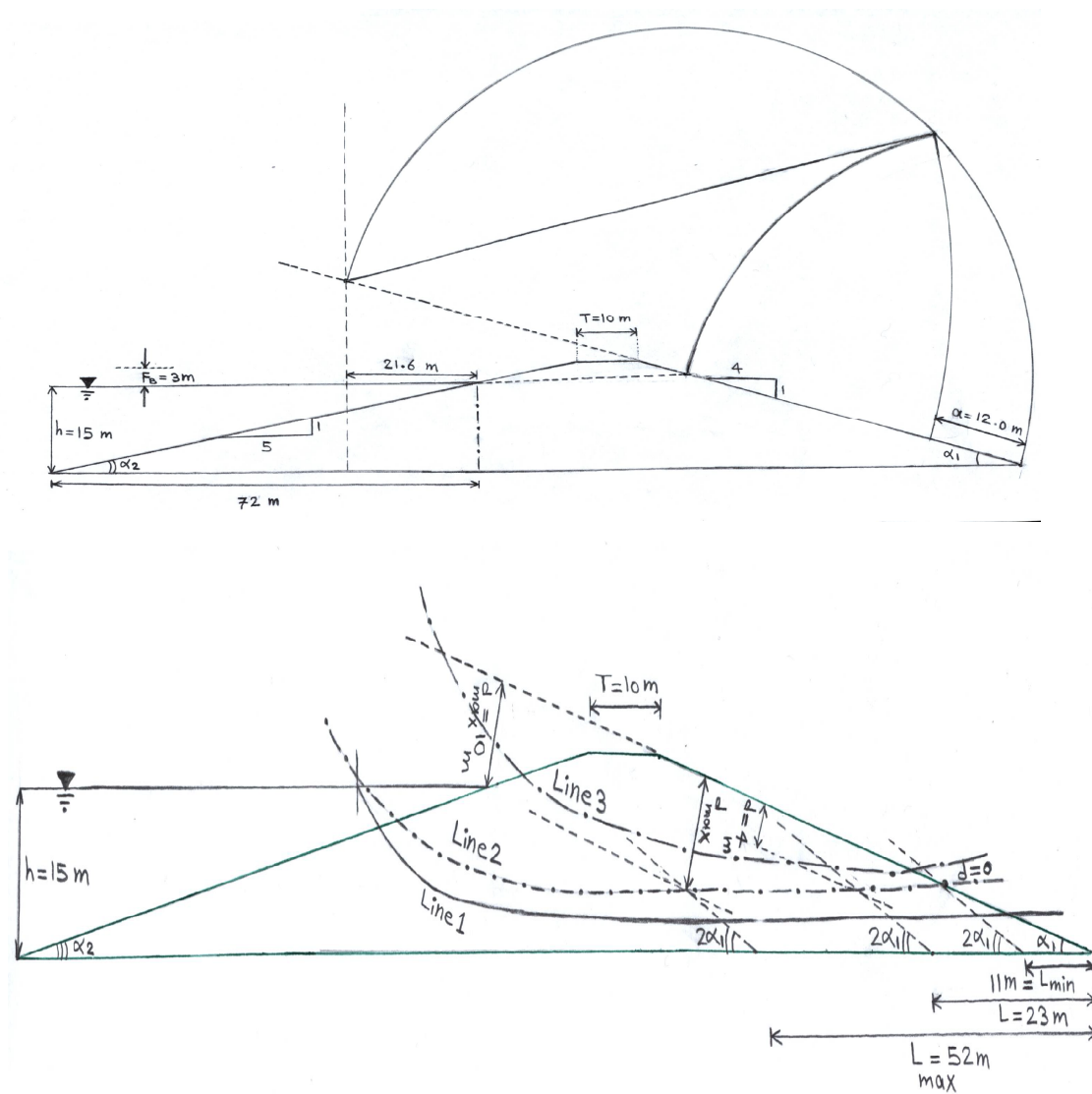
F_B= ارتفاع آزاد = 3m

h= عمق نرمال آب در پشت سد = 15m

L= طول تاج = 1300m

جدول (۱): محاسبه پارامترهای طراحی طول زهکش افقی سد گلستان (۱)

پارامتر روش محاسبه	$l_{\min}$ (m)	l (m)	$l_{\max}$ (m)	$l_{\min}^*$	l^*	$l_{\max}^*$	F_{B^*}	T_*	d (m)	$d_{\max}$ (m)	d^*	$d_{\max}^*$
روش معادلات صریح (شرایط همسان)	۹/۴	۲۰/۵	۵۰/۷	۰/۶	۱/۴	۳/۳۸	۰/۲	۰/۶۶۶	۳/۵۶	۹	۰/۲۴	۰/۶
روش معادلات صریح (شرایط غیر همسان)	۴/۱۱	۲۱/۵	۵۵	۰/۷۴	۱/۴۵	۳/۶۶	۰/۲	۰/۰۸	۳/۵۶	۹	۰/۲۴	۰/۶
روش ترسیمی کاساگرانده	۱۱	۲۳	۵۲	۰/۷۳	۱/۵۳	۳/۴۶	۰/۲	۰/۶۶۶	۴	۱۰	۰/۲۶۶	۰/۶۶۶



شکل (۲): محاسبه مقدار a (محل ظهور خط زه در سطح شیب دار پایاب) برای سد گلستان (۱) به روش ترسیمی کاساگرانده.

شکل (۳): برآورد $l_{\min}$ ، l ، $l_{\max}$ در زهکش افقی سد گلستان (۱) با استفاده از روش ترسیمی کاساگرانده.

۵- نتیجه گیری:

- ۱- پارامترهای $l_{\min}$ ، l ، $l_{\max}$ در شرایط غیر همسان، دارای مقادیر بزرگتری نسبت به شرایط همسان می باشند. و به این دلیل است که در شرایط غیر همسان با توجه به تفاوت نفوذ پذیری افقی و عمودی، عملکرد طول ثابتی از زهکش افقی در پایین آوردن خط زه، کاهش می یابد. لذا برای حفظ بازدهی زهکش افقی در شرایط غیر همسان با همان بازدهی که در شرایط همسان عمل می نماید، مستلزم به این هستیم که طول زهکش افقی را در شرایط غیر همسان بیشتر انتخاب نماییم.
- ۲- مقادیر $l_{\min}$ ، l ، $l_{\max}$ با استفاده از معادلات صریح، به مقادیر بدست آمده از روش ترسیمی کاساگرانده، بسیار نزدیک بوده، به طوری که نتایج این دو روش یکدیگر را تأیید می نمایند.
- ۳- استفاده از معادلات صریح برآورد طول زهکش افقی، بسیار ساده و آسان بوده و بر خلاف روش گرافیکی کاساگرانده، نیاز به تجربه، دقت و مهارت طراح ندارد.
- ۴- برآورد حداکثر پوشش شیب پایین دست ($d_{\max}$)، با استفاده از معادلات صریح، مستقل از طول زهکش بوده و فقط به مشخصات هندسی مقطع سد، وابسته می باشد.
- ۵- از آنجائیکه روش ترسیمی کاساگرانده، نیاز به تجربه و مهارت بالای طراح دارد، لذا روش معادلات صریح می تواند به عنوان معیار و مبنایی جهت کنترل صحت نتایج روش ترسیمی به کار رود.

۵- مراجع:

- {1}chahar,B,(2004). "Determination of length of a horizontal drain in homogeneous earth dams", ASCE, 530-536.
- [۲] رحیمی، حسن (۱۳۸۲). "سدهای خاکی"، انتشارات تهران، چاپ اول.
- [۳] خرقانی، سعید و فخاری، ناصر (۱۳۸۳). "مهندسی سدهای خاکی"، انتشارات دانشگاه صنعت آب و برق، چاپ اول.
- [۴] شرکت سهامی آب منطقه ای استان گلستان - بخش امور سدها