

## تحلیل عددی تأثیر بلانکت رسی و دیوار آب‌بند بر کاهش نشست از پی سد خاکی

فرزاد فرخزاد

استادیار، دانشکده مهندسی عمران، مؤسسه آموزش عالی صنعتی مازندران، بابل، ایران

محمدجواد شعبانی\*

مربی، مؤسسه آموزش عالی طبری، بابل، ایران

فرشاد شجاعی

کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی عمران، مؤسسه آموزش عالی صنعتی مازندران، بابل، ایران

تاریخ پذیرش نهایی: 1397/09/10

تاریخ دریافت مقاله: 1397/04/08

### چکیده

اختلاف تراز آب در دو طرف سدهای خاکی، امکان نشست آب از بدنه و پی سد خاکی را سبب خواهد شد. روش‌های گوناگونی مانند اجرای بلانکت رسی، دیوار آب‌بند و ترکیبی از آن‌ها برای کاهش نشست از بستر سد خاکی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در مقاله حاضر با استفاده از نرم‌افزار Seep/w میزان نشست عبوری از پی سد خاکی تحت تأثیر بلانکت رسی، دیوار آب‌بند و ترکیبی از آن‌ها مطالعه شده است. نتایج این بررسی نشان می‌دهد ترکیب بلانکت و دیوار آب‌بند با ارتفاع کامل تا انتهای لایه نفوذپذیر در مقابل حالت بدون بلانکت، تأثیر چندانی نداشته و درصد کاهش نشست در دو مورد تقریباً یکسان است، ولی در مقابل چنان‌چه از دیوار آب‌بند ناقص به همراه بلانکت استفاده شود، میزان کاهش نشست نسبت به حالت بدون بلانکت افزایش دوبرابری خواهد داشت.

### واژگان کلیدی:

بلانکت رسی، دیوار آب‌بند، سد خاکی، نشست.

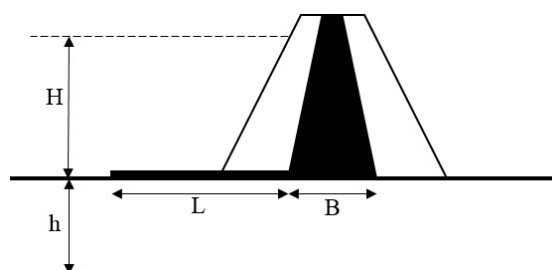
\* نویسنده مسئول مکاتبات: javad.shr@gmail.com

## 1. مقدمه

مسئله تراوش یکی از موضوعات مهم در طراحی و بهره‌برداری از سدهای خاکی است. وجود تراوش از سدهای خاکی اجتناب‌ناپذیر بوده و اگر شرایط مناسبی برای فرسایش خاک وجود داشته باشد، موجب شسته‌شدن نقاط مستعد می‌شود و چنان‌چه در ابتدای بروز، اقدامات لازم صورت نگیرد به تخریب سد منجر خواهد شد. آب جمع‌شده در مخزن سد ممکن است از محل پی سد، تکیه‌گاه‌های جانبی یا از بدنه سد نشت کند. روش‌های متنوعی برای کاهش میزان نشت و کنترل آن وجود دارد. ویژگی‌های سنگ و خاک موجود در بستر سد و تکیه‌گاه آن، مصالح در دسترس برای ساختمان سد، شیوه طراحی و شکل انتخاب‌شده سد و سرانجام محدودیت‌های اجرایی هر یک می‌توانند به شکلی در انتخاب روش‌های مناسب برای آب‌بندی سد مؤثر واقع شوند. یکی از روش‌های کاهش نشت از پی سدهای خاکی ساخته‌شده روی بسترهای آبرفتی با نفوذپذیری بالا، استفاده از بلانکت رسی و اتصال آن به هسته رسی است. آیین‌نامه USBR در سال 1987، برای محاسبه نشت از پی در صورت وجود بلانکت رسی، رابطه زیر را ارائه داده است:

$$Q = f k_f H \quad (1)$$

در این رابطه،  $Q$  دبی در واحد عرض و  $k_f$  ضریب نفوذپذیری بستر است. شیوه محاسبه  $f$  و تعیین  $H$  براساس شکل شماره 1 صورت می‌گیرد.



شکل 1. هندسه سد جهت محاسبه نشت براساس USBR

$$f = \frac{h}{(B + 0.88d)} \quad (2) \quad \text{محاسبه نشت بدون بلانکت}$$

$$f = \frac{h}{(L + B + 0.43d)} \quad (3) \quad \text{محاسبه نشت با حضور بلانکت}$$

از روش‌های دیگر کاهش نشت از پی سد خاکی، استفاده از دیوار آب‌بند با ارتفاع‌های مختلف است. آیین‌نامه USACE در سال 2004 رابطه زیر را برای محاسبه کاهش نشت از پی سد در اثر احداث

دیوار آببند توصیه کرده است:

$$Q/k_f H = 1 / \left( 0.88 + \left( \frac{B}{H} \right) + \left( \left( \frac{k_f}{k_w} \right) - 1 \right) \left( \frac{t_w}{H} \right) \right) \quad (4)$$

با توجه به این رابطه،  $k_w$  ضریب نفوذپذیری دیوار آببند و  $t_w$  ضخامت آن است. معرفی پارامترهای دیگر مطابق با رابطه 1 و شکل 1 است. در سال‌های گذشته مطالعات آزمایشگاهی، تحلیلی و عددی متنوعی در مورد مسئله نشت انجام شده است [1 و 8]. نخستین مطالعه انجام گرفته در زمینه نشت از پی سدهای خاکی توسط ترذاقی<sup>1</sup> انجام گرفت. وی با تحلیل نشت از بدنه و پی سد خاکی و با توجه به ضریب نفوذپذیری مصالح تشکیل دهنده، نتیجه خود را ارائه داد. او با در نظر گرفتن عمق‌های مختلف از پرده آببند واقع شده در پی سد خاکی، به ارزیابی نشت از پوسته و پی پرداخت. ارزیابی او براساس روش شبکه جریان ترسیم شده برای هر حالت انجام گرفته بود. بنت<sup>2</sup> در مطالعه‌ای در سال 1946، معادله دیفرانسیل حاکم بر تراوش در سدهایی با پوشش بالادست (بلانکت) را به دست آورد و ارائه داد. بنت روابط محاسبه طول مؤثر بلانکت را در حالات مختلف نامحدود و محدود به دست آورد. شهرکی و همکاران در سال 1392 تحلیل عددی کارایی تزریق پرده آببند سد شهر بیجار را بررسی کردند. نتایج حاصل از این بررسی نشان داد بهترین مکان قرارگیری پرده آببند برای کاهش نشت، در پنجه هسته سد بوده است. براساس مطالعات گوهرنژاد<sup>3</sup> و همکاران در سال 2010 بر روی سد فریم صحرا مازندران، میزان طول مناسب بلانکت در بالادست سد 150 متر تعیین شد. قنبری و زریابی<sup>4</sup> (2014) تأثیر ترانشه رسی بر کنترل نشت در پی سدهای خاکی را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد هرچه نسبت عرض کف ترانشه به عرض کف هسته کمتر شود، مقدار نشت نیز کاهش خواهد یافت. منصورى<sup>5</sup> و همکاران در سال 2014 تأثیر محل و زاویه دیوار آببند بر فشار بالا برنده در سد انحرافی را بررسی کردند. نتایج این مطالعه نشان داد با زاویه دار کردن دیوار آببند به سمت بالادست سد، نیروی بالا برنده کاهش قابل ملاحظه‌ای خواهد داشت.

بررسی‌های انجام گرفته در متون علمی نشان می‌دهد مسئله نشت از پی سد خاکی دارای اهمیت بسیار بوده است. در روابط ارائه شده در رابطه با محاسبه نشت، تأثیرات قابل ملاحظه مشخصات مصالح مورد استفاده در نظر گرفته نشده است؛ از این رو در مطالعه حاضر تحلیل پدیده نشت از پی سد خاکی با استفاده از نرم افزار Seep/w مورد بررسی قرار گرفت. در تحلیل‌های حاضر، پارامترهایی مانند تأثیر بلانکت رسی،

1. Terzaghi  
3. Ghoharnejad  
5. Mansuri

2. Bennet  
4. Ghanbari & Zaryabi

دیوار آب‌بند و ترکیب آن‌ها بر میزان درصد کاهش نشت از پی سد مورد بررسی قرار گرفته است.

## 2. مبانی نظری معادله نشت

معادله اصل بقای جرم در یک محیط متخلخل به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{\partial(\rho_f n)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial X_i}(\rho_f q_i) = 0 \quad (5)$$

که در آن  $\rho_f$  معرف دانسیته آب ( $\text{kg/m}^3$ )،  $n$  معرف ضریب تخلخل،  $X_i$  معرف فاصله،  $q_i$  معرف جریان نشت (جریان داری،  $\text{m/s}$ ) و  $t$  معرف زمان است. سرعت نشت آب را می‌توان براساس قانون داری و با استفاده از رابطه زیر توصیف کرد:

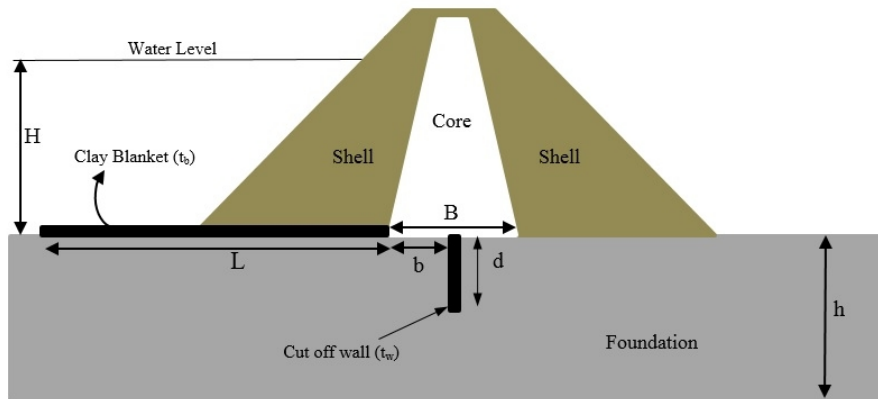
$$q_i = -\frac{k_{ij}}{\mu} \left( \frac{\partial p}{\partial X_j} + \rho_f g_i \right) \quad (6)$$

که در آن  $k_{ij}$  معرف نفوذپذیری،  $X_i$  معرف ویسکوزیته،  $p$  معرف فشار و  $g_i$  معرف شتاب ثقل است. با ترکیب معادلات 5 و 6، معادله نشت آب به صورت رابطه 7 تعیین می‌شود. با توجه به این معادله، میزان نشت وابسته به فشار یا سطح پیزومتریک بوده و با تغییر دانسیته آب تغییر خواهد کرد:

$$\frac{\partial(\rho_f n)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial X_i} \left( k_{ij} \frac{\partial p}{\partial X_j} + \rho_f k_{ij} g_i \right) = 0 \quad (7)$$

## 3. مدل‌سازی

در تحقیق حاضر، به‌منظور انجام تحلیل‌ها از نرم‌افزار Seep/w 2012 استفاده شده است. همچنین سد خاکی با مشخصات هندسی نشان‌داده‌شده در شکل شماره 2 در نظر گرفته شده است. با توجه به این شکل، پارامترهای هندسه سد عبارتند از: طول بلانکت رسی ( $L$ )، ضخامت بلانکت رسی ( $t_b$ )، ضریب نفوذپذیری بلانکت رسی ( $k_b$ )، عمق پی ( $h$ )، ضریب نفوذپذیری پی ( $k_f$ )، عمق دیوار آب‌بند ( $d$ )، ضخامت دیوار آب‌بند ( $t_w$ )، ضریب نفوذپذیری دیوار آب‌بند ( $k_w$ ). در جدول شماره 1 محدوده پارامترهای مورد بررسی ارائه شده است. ارتفاع آب پشت سد ( $H$ ) ثابت و برابر 40 متر منظور شده است. برای تراوش از بستر سد خاکی، نفوذپذیری هسته در حالت None قرار داده می‌شود؛ از این‌رو میزان نشت عبوری از پی سد خاکی تحت تأثیر پارامترهای مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت.



شکل 2. هندسه سد خاکی مورد بررسی در تحلیل‌های Seep/w

جدول 1. مشخصات هندسه و مصالح خاکی

مشخصات	پی	بلانکت	دیوار آب‌بند
طول (متر)	-	50 تا 350	12/5 تا 50
ضخامت (متر)	50	1/5 تا 0/5	1/5 تا 0/5
ضریب نفوذپذیری (m/s)	$10^{-4}$ تا $10^{-3}$	$10^{-8}$ تا $10^{-6}$	$10^{-6}$

4. ارائه نتایج

با توجه به مطالب بیان‌شده در این بخش، نتایج حاصل از درصد کاهش نشت<sup>1</sup> از بستر سد خاکی با استفاده از روش بلانکت رسی، دیوار آب‌بند و روش ترکیبی ارائه شده است.

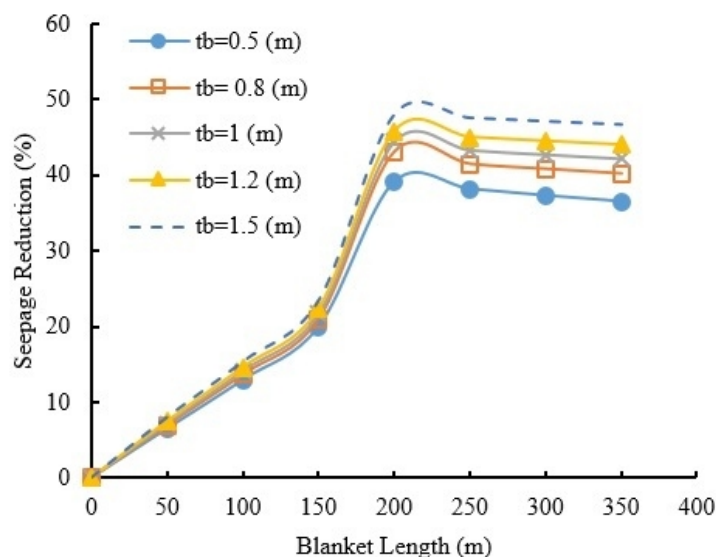
4-1. تأثیر بلانکت رسی

شکل‌های 3 و 4 تأثیر طول بلانکت رسی را بر کاهش نشت عبوری از پی سد خاکی نمایش می‌دهد. با توجه به این اشکال، با افزایش طول بلانکت، میزان نشت عبوری از بستر سد، روند کاهشی می‌یابد؛ البته تأثیر کاهش نشت به نفوذپذیری بلانکت وابسته بوده و با توجه به این شکل‌ها، بلانکت با نفوذپذیری  $10^{-7}$  متر بر ثانیه (شکل شماره 3) نسبت به بلانکت با نفوذپذیری  $10^{-6}$  متر بر ثانیه (شکل شماره 4) درصد کاهش نشت بیشتری را نشان داده است. درصد کاهش نشت حاصل از بلانکت با نفوذپذیری  $10^{-7}$  متر بر ثانیه با هر ضخامتی و با طول بیش از 200 متر تقریباً ثابت بوده

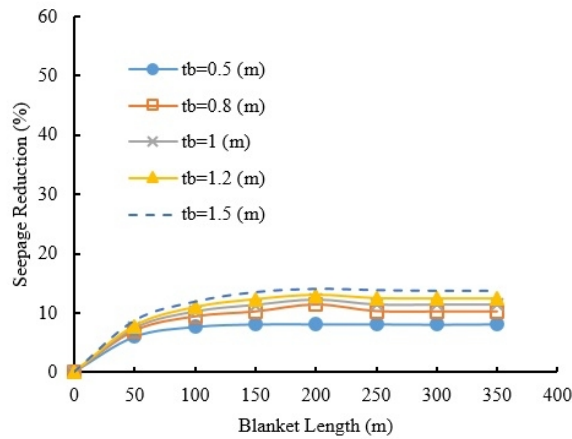
1. Seepage Reduction Percent

است، در حالی که همین روند برای بلانکت با نفوذپذیری  $10^{-6}$  متر بر ثانیه برای طول‌های بیش از 100 متر تقریباً ثابت است.

تأثیر ضخامت بلانکت بر کاهش نشت در شکل شماره 5 نشان داده شده است. همان‌طور که از این شکل پیداست، با افزایش ضخامت بلانکت رسی میزان کاهش نشت افزایش یافته است. از این شکل‌ها می‌توان متوجه شد، تأثیر افزایش نشت برای بلانکت‌هایی با ضخامت بیش از 0/5 متر قابل توجه نخواهد بود؛ از این رو می‌توان اجرای بلانکت‌های رسی با ضخامت بین 0/5 تا 1 متر را برای درصد کاهش نشت از پی سدهای خاکی مناسب در نظر گرفت. همچنین با توجه به شکل‌های 3، 4 و 5، کاهش نشت برای طول بلانکت رسی بیش از 200 متر قابل توجه نیست؛ بنابراین می‌توان طول مناسب بلانکت را برای اجرا، 200 متر در نظر گرفت.

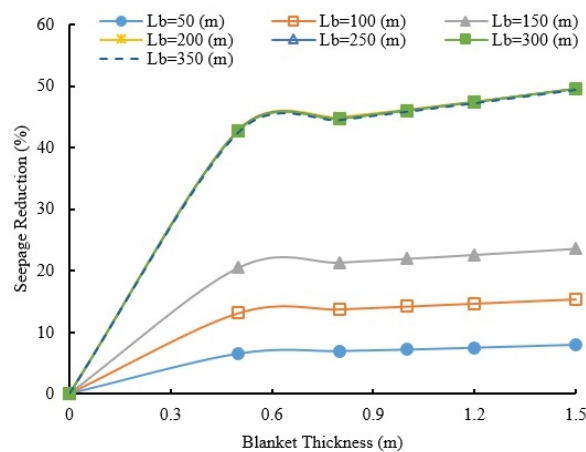


شکل 3. تأثیر ضخامت و طول بلانکت در کاهش نشت از پی ( $K_p=10^{-7}$  m/s)



شکل 4. تأثیر ضخامت و طول بلانکت در کاهش نشت از پی ( $K_b=10^{-6}$  m/s)

برای بررسی نتایج حاصل از تحلیل حاضر با روابط ارائه‌شده توسط USBR، مقایسه‌ای در جدول شماره 2 ارائه شده است. در روابط ارائه‌شده توسط آیین‌نامه USBR تأثیرات ضخامت بلانکت و نفوذپذیری بستر و بلانکت لحاظ نشده و تنها درصد کاهش نشت وابسته به طول و عمق بستر است. همان‌طور که جدول شماره 2 نشان می‌دهد، نتایج حاصل از تحلیل حاضر اختلاف قابل‌توجهی با روابط ارائه‌شده دارد. یکی دیگر از نکات قابل‌توجه در این جدول که می‌توان به آن اشاره کرد، تأثیر کم‌کاهش نشت برای طول‌های بیش از 200 متر است که هم در تحلیل حاضر و هم با روابط USBR قابل‌مشاهده است؛ از این‌رو توصیه می‌شود در طراحی سدهای خاکی از روابط آیین‌نامه USBR با دقت بیشتر و همراه با نتایج حاصل از تحلیل‌های عددی استفاده شود.



شکل 5. تأثیر ضخامت و طول بلانکت در کاهش نشت از پی ( $K_b=10^{-8}$  m/s)

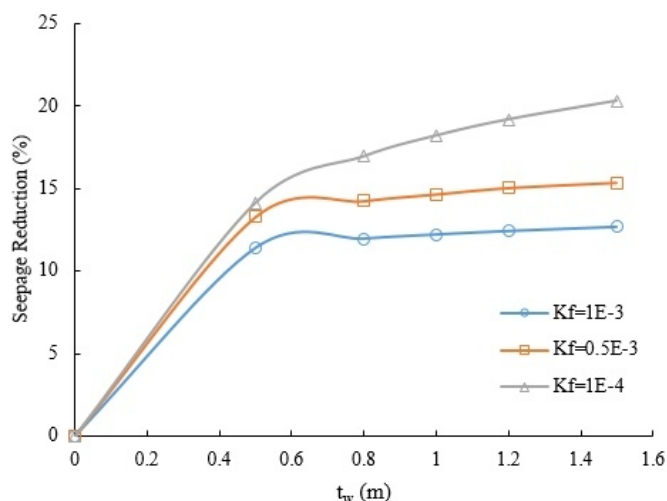
جدول 2. مقایسه درصد کاهش نشت حاصل از مطالعه حاضر (با  $t_w=0.8$  متر) با آیین نامه USBR

طول بلانکت (متر)	50	100	150	200	250	300	350
آیین نامه و تحلیل عددی							
USBR (1987)	27/1	51/1	63/3	70/6	75/5	78/9	81/6
Seep/w ( $m/s$ $K_f=10^{-4}$ , $K_b=10^{-6}$ )	6/9	9/3	10/2	11/4	10/2	10/2	10/2
Seep/w ( $K_f=10^{-3}$ , $K_b=10^{-7}$ m/s)	6/9	13/6	21	43/1	41/4	40/8	40/2

## 4-2. تأثیر دیوار آب‌بند

برای بررسی دیوار آب‌بند، پارامترهایی مانند ضخامت ( $t_w$ )، ارتفاع ( $d$ )، محل قرارگیری ( $b/B$ )، زاویه ( $\alpha$ ) نسبت به افق در سمت بالادست و پایین دست مورد توجه قرار گرفته است. نتایج به دست آمده در شکل‌های 6 تا 10 نشان داده شده است.

شکل شماره 6 تأثیر ضخامت دیوار آب‌بند بر درصد کاهش نشت از پی تحت ضرایب نفوذپذیری مختلف مصالح بستر را نشان می‌دهد. همان گونه که مشاهده می‌شود، با افزایش ضخامت دیوار آب‌بند، میزان درصد کاهش نشت از پی سد، روند افزایشی دارد. البته این روند با کاهش نفوذپذیری بستر مشهودتر است؛ بنابراین انتخاب ضخامت دیوار آب‌بند بین 0/4 تا 0/8 متر، می‌تواند مناسب‌ترین محدوده برای استفاده در کارهای طراحی و اجرایی باشد.

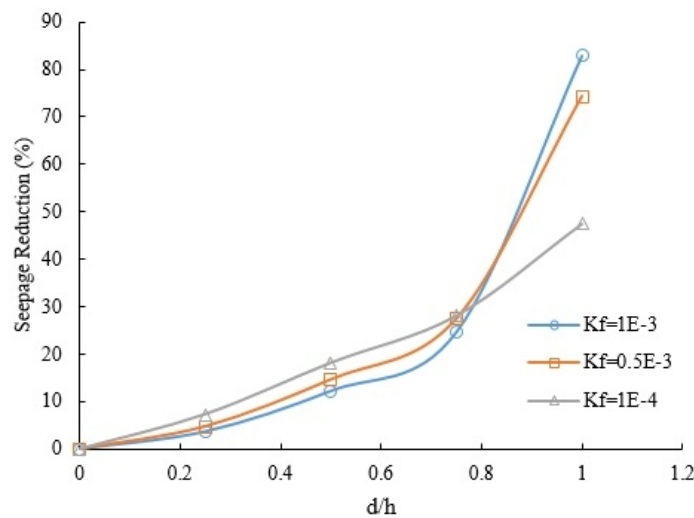


شکل 6. تأثیر ضخامت دیوار آب‌بند بر کاهش نشت

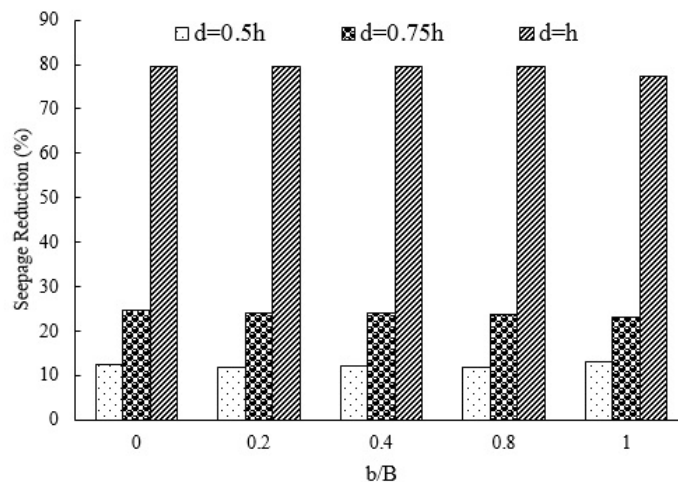


در شکل شماره 7 تأثیر ارتفاع دیوار آب‌بند ( $d$ ) نسبت به  $h$  که معرف عمق تا سنگ بستر نفوذناپذیر است، نشان داده می‌شود. همان‌طور که می‌بینید، با افزایش عمق، میزان درصد کاهش نشت از بستر افزایش می‌یابد. همچنین از نسبت ارتفاع  $0/8$  میزان کاهش نشت، افزایش قابل‌توجهی را نشان داده است. افزایش میزان کاهش نشت با افزایش نسبت ارتفاع به بیش از  $0/8$  در مصالح با نفوذپذیری بالاتر نیز قابل‌توجه بوده است. براساس این موارد، شاید امکان استفاده از پرده آب‌بند به ارتفاع  $h$  کمتر مدنظر طراحان و مجری‌ها قرار گرفته باشد، اما استفاده از پرده آب‌بند با ارتفاع مناسب می‌تواند موجب کاهش قابل‌توجهی از میزان نشت از پی سد خاکی شود.

شکل شماره 8 تأثیر جایگاه قرارگیری دیوار آب‌بند در زیر هسته بر درصد کاهش نشت را نشان داده است. در این شکل،  $B$  عرض کف هسته و  $b$  فاصله از پای شیب بالادست هسته هستند. با بررسی انجام‌گرفته در نسبت ارتفاع‌های مختلف آب‌بند و در مکان‌های متفاوت در زیر هسته، تغییرات قابل‌ملاحظه‌ای در کاهش نشست مشاهده نشده است. همچنین گستره تغییرات به کمتر از 5 درصد رسیده است؛ از این‌رو محل قرارگیری دیوار آب‌بند تأثیری بر میزان کاهش نشت نخواهد داشت؛ بنابراین در کل تحلیل‌ها محل قرارگیری دیوار آب‌بند در وسط کف هسته است.

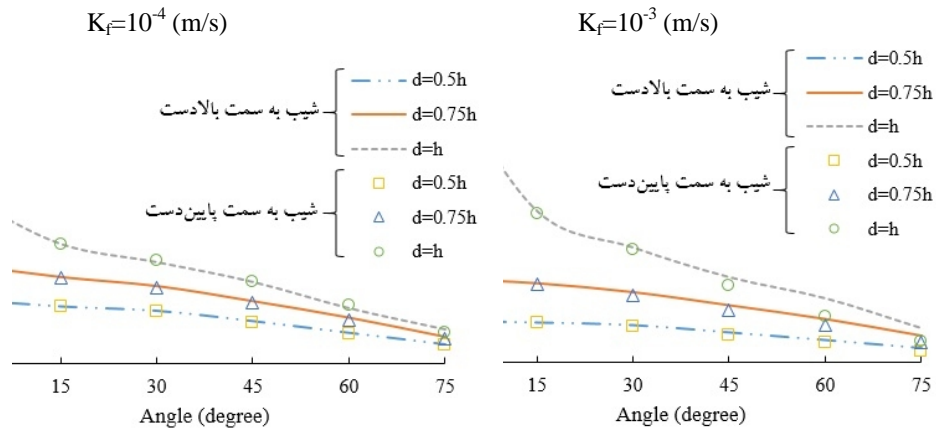


شکل 7. تأثیر ارتفاع دیوار آب‌بند بر کاهش نشت



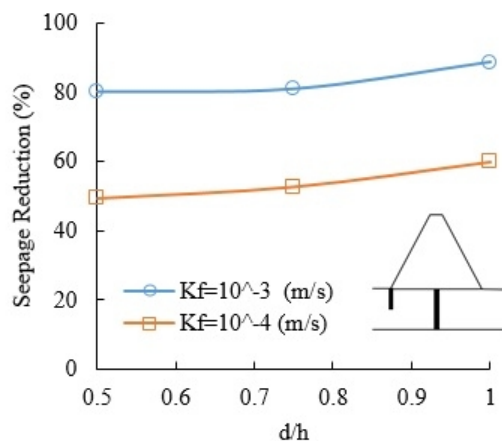
شکل 8. تأثیر جایگاه دیوار آب‌بند بر کاهش نشت

تأثیر زاویه‌دار کردن دیوار آب‌بند به سمت بالادست و پایین‌دست، در شکل شماره 9 نشان داده شده است. با افزایش زاویه دیوار آب‌بند نسبت به قائم، میزان درصد کاهش نشت، روند کاهشی داشته است؛ از این رو زاویه‌دار کردن دیوار آب‌بند تأثیر منفی را بر کاهش نشت نشان داده است؛ ضمن اینکه اختلاف قابل‌ملاحظه‌ای بین نتایج حاصل از دیوار آب‌بند زاویه‌دار به سمت بالادست و پایین‌دست مشاهده نشده است. با توجه به این نمودارها در شرایطی که نسبت ارتفاع دیوار آب‌بند به عمق بستر برابر یک باشد، تأثیر منفی زاویه‌دار کردن بر روی درصد کاهش نشت، بیشتر شده است. از دلایل تأثیر منفی دیوار آب‌بند زاویه‌دار بر کاهش نشت این است که در حالت  $d=h$  با زاویه‌دار شدن یک کانال برای عبور نشت به دلیل فاصله ایجاد شده بین مرز نفوذناپذیر و انتهای دیوار آب‌بند ایجاد می‌شود. همچنین برای حالت‌های  $d < h$  فاصله ایجاد شده بین مرز نفوذناپذیر و انتهای دیوار آب‌بند بیشتر خواهد شد.

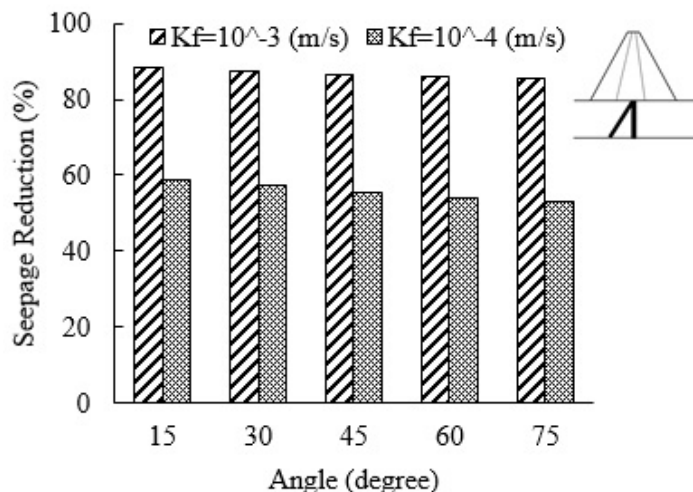


شکل 9. تأثیر زاویه دیوار آببند بر کاهش نشت

شکل شماره 10 تأثیر ترکیب دو دیوار آببند را بر کاهش نشت از بستر سد نشان داده است. در این بررسی یک دیوار آببند در مرکز کف هسته ( $d=h$ ) و دیگری در ابتدای بالادست کف هسته ( $d \leq h$ ) و با ارتفاعهای متفاوت قرار داده شده است. همان گونه که در شکل مشاهده می شود، ترکیب دو دیوار آببند میزان کاهش نشت در حدوده 10 درصد را نسبت به حالت دیوار آببند منفرد نشان می دهد. در ادامه، تأثیر ترکیبی دو دیوار آببند که یکی قائم و دیگری به صورت شیبدار به سمت بالادست است، بر درصد کاهش نشت مورد بررسی قرار گرفت. نتیجه این بررسی در شکل شماره 11 نشان داده شده است. براساس تحلیل انجام گرفته، تأثیر شیبدار کردن دیوار آببند که تا انتهای بستر قرار گرفته است، برای تمام زوایا کمتر از 5 درصد میزان نشت را بهبود داده است.



شکل 10. تأثیر ترکیب دو دیوار آببند قائم بر کاهش نشت از بستر



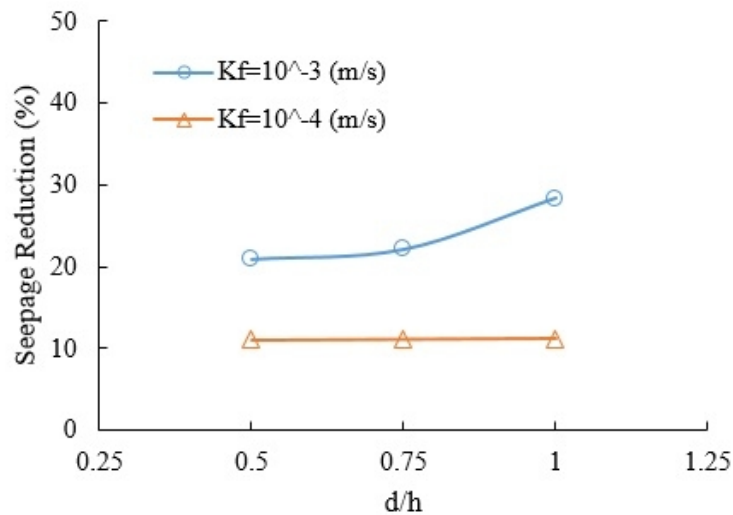
شکل 11. تأثیر ترکیب دو دیوار آب‌بند قائم شیب‌دار بر کاهش نشت از بستر

#### 4-3. تأثیر ترکیب دیوار آب‌بند و بلانکت رسی

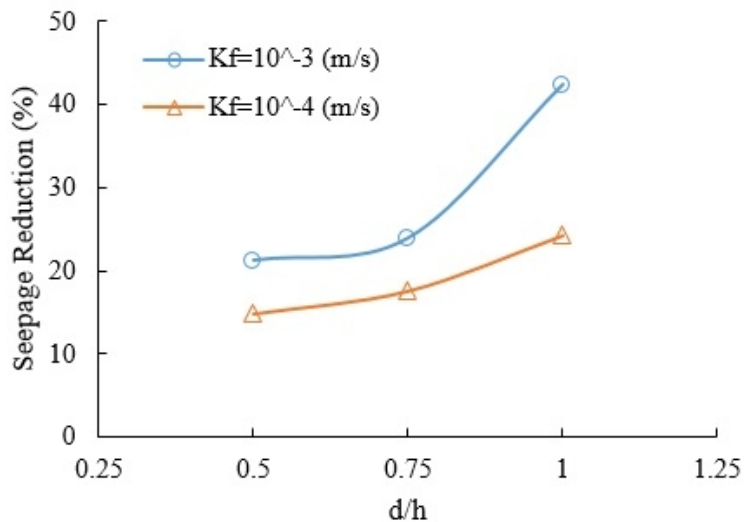
امروزه برای کاهش بیشتر نشت از بستر سدهای خاکی از روش‌های ترکیبی بلانکت با دیوار آب‌بند استفاده می‌شود. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از بخش‌های پیشین، در این قسمت تأثیر ترکیبی بلانکت رسی و دیوار آب‌بند بر درصد کاهش نشت از بستر سد خاکی مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل‌های 12، 13 و 14 تأثیر همزمان بلانکت و دیوار آب‌بند در شرایط مختلف نفوذپذیری بستر و بلانکت ارائه شده است. در این تحلیل‌ها طول بلانکت 200 متر و ضخامت بلانکت و دیوار آب‌بند برابر 0/8 متر انتخاب شده است. همچنین محل قرارگیری دیوار آب‌بند در ابتدا و انتهای بلانکت و در وسط کف هسته قرار داده شد.

زمانی که دیوار آب‌بند در ابتدای بلانکت رسی قرار گرفته است (شکل شماره 12)، تأثیر کاهش نشت برای ارتفاع‌های مختلف دیوار تقریباً یکسان بوده است. همچنین تأثیر بلانکت و دیوار در شرایطی که نفوذپذیری بستر افزایش یابد، میزان درصد کاهش نشت بیشتری را نشان می‌دهد. با توجه به شکل شماره 12، در این شرایط میزان کاهش نشت بین 9 تا 17 درصد بیشتر است. همان‌گونه که از شکل‌های 13 و 14 برمی‌آید، با افزایش فاصله دیوار آب‌بند از ابتدای بلانکت به انتهای آن (نزدیک به پنجه هسته)، تأثیر بیشتری بر درصد کاهش نشت به دست آمده است. با توجه به شکل شماره 13 میزان کاهش نشت در شرایط دیوار آب‌بند کامل بسیار بیشتر شده است. بیشترین درصد کاهش نشت برای بستر با نفوذپذیری 4-10 متر بر ثانیه، حدود 13 درصد بیشتر از حالت قبل

دیوار در ابتدای بلانکت) شده است. همچنین این کاهش برای شرایط بستر با نفوذپذیری 3-10 متر بر ثانیه به حدود 14 درصد رسیده است.



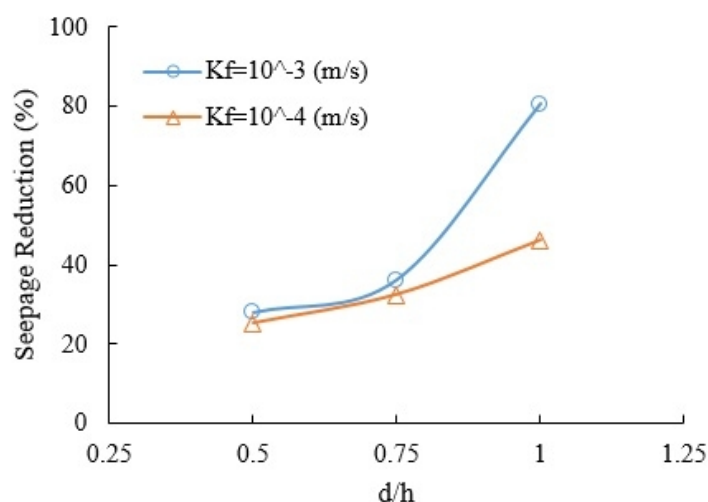
شکل 12. تأثیر همزمان بلانکت و دیوار آب‌بند در ابتدای بلانکت بر درصد کاهش نشت



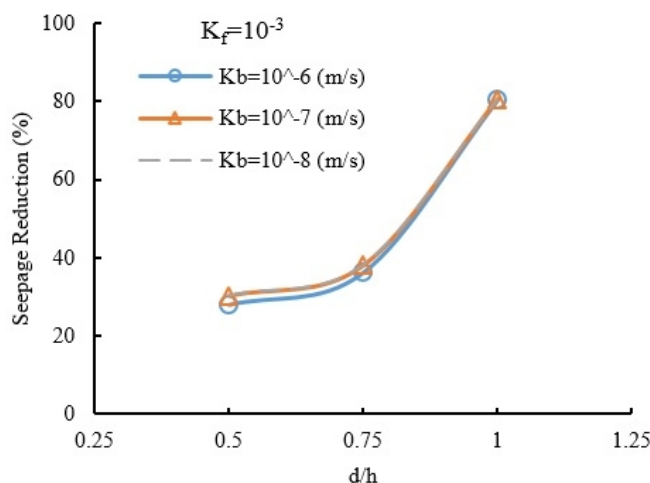
شکل 13. تأثیر همزمان بلانکت و دیوار آب‌بند در انتهای بلانکت بر درصد کاهش نشت

تأثیر قرارگیری دیوار در وسط کف هسته تحت شرایط نفوذپذیری مختلف بستر در شکل شماره 14 نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود میزان درصد کاهش نشت با بیشتر شدن ارتفاع دیوار آب‌بند و نفوذپذیری بستر، افزایش یافته است. با توجه به این شکل، بیشترین کاهش نشت برای بستر با

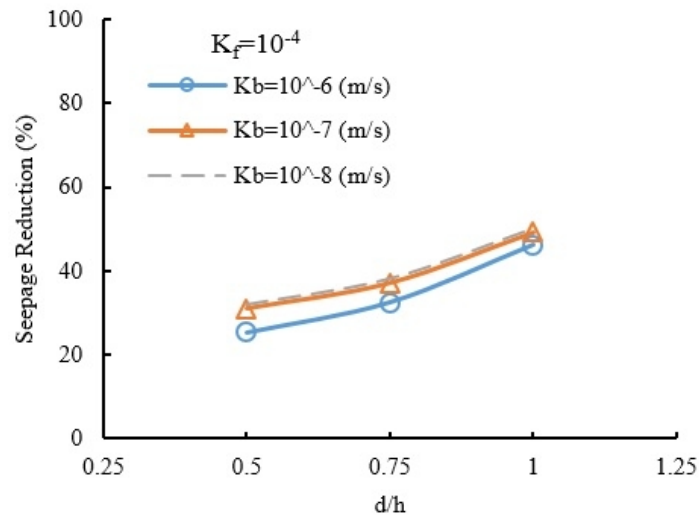
نفوذپذیری  $10^{-4}$  متر بر ثانیه نسبت به حالت دیوار در ابتدا و انتهای بلانکت به ترتیب حدود 35 و 22 درصد بیشتر شده است. افزون‌براین در شرایط بستر با نفوذپذیری  $10^{-3}$  متر بر ثانیه، میزان کاهش نشت نسبت به حالت دیوار در ابتدا و انتهای بلانکت به ترتیب در حدود 52 و 38 درصد را نشان می‌دهد. شکل‌های 15 و 16 تأثیر ترکیبی دیوار آب‌بند و بلانکت را در شرایط نفوذپذیری‌های مختلف بلانکت نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش ارتفاع دیوار آب‌بند، میزان کاهش نشت برای تمامی نفوذپذیری‌های متفاوت بلانکت به‌طور مشابه افزایش یافته است.



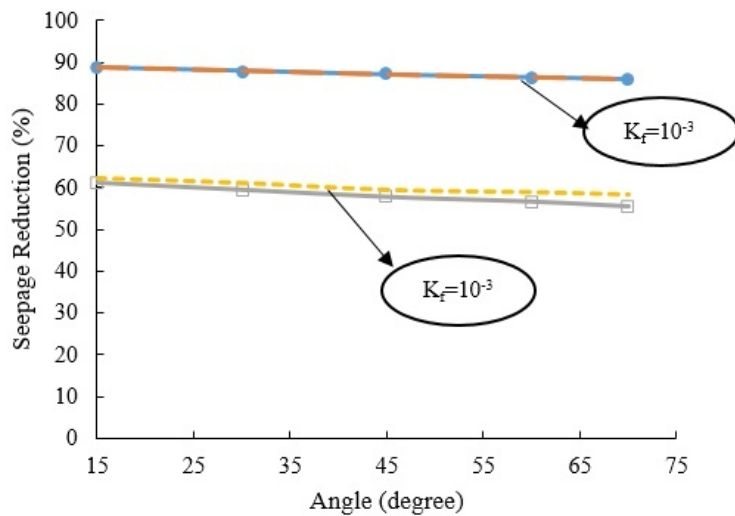
شکل 14. تأثیر همزمان بلانکت و دیوار آب‌بند در وسط کف هسته بر درصد کاهش نشت



شکل 15. تأثیر دیوار آب‌بند در وسط کف هسته در شرایط نفوذپذیری مختلف بلانکت ( $K_f=10^{-3}$  m/s)



شکل 16. تأثیر دیوار آب‌بند در وسط کف هسته تحت شرایط نفوذپذیری مختلف بلانکت ( $K_f=10^{-4}$  m/s)



شکل 17. تأثیر بلانکت و دو دیوار آب‌بند (دیوار آب‌بند در حالت قائم و شیب‌دار)

شکل شماره 17 تأثیر ترکیب بلانکت و دو دیوار آب‌بند را بر کاهش نشت نشان می‌دهد. در این بررسی، یکی از دیوارها قائم و به ارتفاع  $h$  و دیگری به صورت زاویه‌دار و در کل ارتفاع بستر ایجاد شد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود با اضافه کردن دیوار آب‌بند تأثیری در کاهش نشت ایجاد نشده است. تأثیر ترکیبی بلانکت و دو دیوار آب‌بند بر کاهش نشت در شرایط جای‌گیری مختلف، در شکل شماره 18 نشان داده شده است. در این بخش، یک دیوار آب‌بند در وسط کف هسته ثابت نگه داشته

شده و دیوارهای دیگر در سه منطقه مختلف مطابق شکل شماره 18 قرار گرفتند. همان طور که مشاهده می‌شود، با افزایش فاصله دیوار آب‌بند از ابتدای بلانکت (بالادست) میزان درصد کاهش نشت افزایش یافته است. حداکثر کاهش نشت وقتی که دیوار آب‌بند در زیر کف هسته قرار داده شود، رخ می‌دهد. مطالعه کاهش نشت از پی سد خاکی تحت تأثیر سه عامل مختلف بررسی شده است: بلانکت رسی، دیوار آب‌بند و روش ترکیب این دو مورد. مهم‌ترین نتایج حاصل از این بررسی در جدول شماره 3 ارائه شده است.

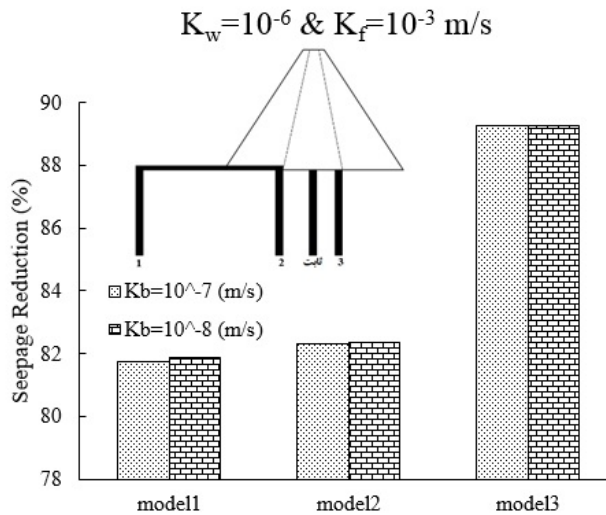
با توجه به مهم‌ترین نتایج ارائه شده در جدول شماره 3، تأثیر بلانکت تحت تأثیر پارامترهای مختلف منجر به کاهش قابل توجه میزان نشت از پی سد خاکی شده است. هرچه میزان نفوذپذیری بلانکت کمتر باشد، میزان نشت عبوری کاهش بیشتری را نشان می‌دهد. تأثیر ضخامت‌های بین 0/5 تا 1 متر بر کاهش نشت قابل توجه نبوده است و تعیین ضخامت می‌تواند در این محدوده قرار گیرد. همچنین با بررسی انجام گرفته، بهترین طول برای بلانکت رسی 200 متر انتخاب شده است. در نهایت می‌توان اشاره کرد که با اجرای بلانکت رسی با طول 200 متر و ضخامت بین 0/5 تا 1 متر و با نفوذپذیری در محدوده 7-10 تا 8-10، میزان کاهش نشت از بستر سد خاکی به بیش از 40 درصد خواهد رسید.

نسبت به بلانکت رسی، اجرای دیوار آب‌بند تأثیر بیشتری بر میزان کاهش نشت عبوری از پی سد خاکی داشته است. همان گونه که در جدول شماره 3 ارائه شده است، ضخامت دیوار آب‌بند تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر کاهش نشت ندارد؛ بنابراین می‌توان مناسب‌ترین ضخامت برای دیوار آب‌بند را 0/8 متر دانست. در صورتی که دیوار آب‌بند به صورت ناقص به اجرا درآید و تا انتهای لایه نفوذپذیر اجرا نشود، تأثیرات بسیار کمتری را نسبت به حالت ارتفاع کامل دیوار آب‌بند خواهد داشت. در این صورت اجرای کامل دیوار آب‌بند تا انتهای لایه نفوذپذیر، میزان نشت عبوری را به بیش از دو برابر حالت ناقص، کاهش خواهد داد. از دیگر موارد مورد توجه بر کاهش نشت، نفوذپذیری بستر است. چنانچه میزان نفوذپذیری بیشتر باشد تأثیر دیوار آب‌بند بر کاهش نشت بیشتر خواهد شد. افزون بر موارد گفته شده، اجرای دو لایه دیوار آب‌بند و با فاصله از هم در کف هسته نسبت به حالت تک لایه، میزان نشت عبوری را حدود 10 درصد بیشتر کاهش داده است.

اجرای ترکیبی دیوار آب‌بند و بلانکت رسی در اجرای سدهای خاکی مورد توجه است. یکی از نکات مورد توجه، در این بررسی نشان داده است؛ چنانچه ترکیب بلانکت و دیوار آب‌بند با ارتفاع کامل تا انتهای لایه نفوذپذیر، تأثیر چندانی نسبت به حالت بدون بلانکت نداشته است و درصد کاهش نشت در دو مورد تقریباً یکسان است، ولی در مقابل، اگر از دیوار آب‌بند ناقص به همراه بلانکت استفاده شود، میزان کاهش نشت نسبت به حالت دیوار آب‌بند ناقص تنها دو برابر خواهد شد.



علاوه بر این، اجرای دیوار آببند دوبل به همراه بلانکت تأثیر قابل ملاحظه‌ای نسبت به حالت دیوار دوبل و بدون بلانکت نشان نداده و در هر دو مورد میزان کاهش نشت تقریباً یکسان است.



شکل 18. تأثیر ترکیبی از بلانکت و دو دیوار آببند بر کاهش نشت

جدول 3. نتایج حاصل از مهم‌ترین تأثیر عوامل مختلف بر درصد کاهش نشت

$K_f$	$K_b$	$K_w$	$t_b$	L	$t_w$	d	درصد کاهش نشت
$10^{-3}$	$10^{-6}$	-	0/5	200	-	-	8/1
$10^{-3}$	$10^{-6}$	-	0/8	200	-	-	11/4
$10^{-3}$	$10^{-6}$	-	1	200	-	-	12/2
$10^{-3}$	$10^{-7}$	-	0/5	200	-	-	39/1
$10^{-3}$	$10^{-7}$	-	0/8	200	-	-	43/1
$10^{-3}$	$10^{-7}$	-	1	200	-	-	44/2
$10^{-3}$	$10^{-8}$	-	0/5	200	-	-	42/9
$10^{-3}$	$10^{-8}$	-	0/8	200	-	-	44/9
$10^{-3}$	$10^{-8}$	-	1	200	-	-	46/2
$10^{-3}$	-	$10^{-6}$	-	-	0/8	h0/75	24/1
$10^{-3}$	-	$10^{-6}$	-	-	1	h0/75	24/6
$10^{-4}$	-	$10^{-6}$	-	-	0/8	h0/75	28/1

$K_f$	$K_b$	$K_w$	$t_b$	L	$t_w$	d	درصد کاهش نشت
$10^{-4}$	-	$10^{-6}$	-	-	1	h0/75	28/1
$10^{-3}$	-	$10^{-6}$	-	-	0/8	h	79/5
$10^{-3}$	-	$10^{-6}$	-	-	1	h	82/9
$10^{-4}$	-	$10^{-6}$	-	-	0/8	h	47/5
$10^{-4}$	-	$10^{-6}$	-	-	1	h	47/5
$10^{-3}$	-	$10^{-6}$	-	-	0/8	h (دوایل)	88/6
$10^{-4}$	-	$10^{-6}$	-	-	0/8	h (دوایل)	59/9
$10^{-3}$	$10^{-6}$	$10^{-6}$	0/8	200	0/8	h0/75	36/2
$10^{-3}$	$10^{-6}$	$10^{-6}$	0/8	200	0/8	h	80/5
$10^{-4}$	$10^{-6}$	$10^{-6}$	0/8	200	0/8	h0/75	32/5
$10^{-4}$	$10^{-6}$	$10^{-6}$	0/8	200	0/8	h	46/1
$10^{-3}$	$10^{-8}$	$10^{-6}$	0/8	200	0/8	h0/75	38/3
$10^{-3}$	$10^{-8}$	$10^{-6}$	0/8	200	0/8	h	80/6
$10^{-4}$	$10^{-8}$	$10^{-6}$	0/8	200	0/8	h0/75	38/1
$10^{-4}$	$10^{-8}$	$10^{-6}$	0/8	200	0/8	h	49/9
$10^{-3}$	$10^{-7}$	$10^{-6}$	0/8	200	0/8	h (دوایل)	89/3
$10^{-3}$	$10^{-8}$	$10^{-6}$	0/8	200	0/8	h (دوایل)	89/3

### 5. نتیجه گیری

در مطالعه حاضر با کمک نرم افزار Seep/w بررسی میزان نشت از بستر سد خاکی با وجود بلانکت رسی، دیوار آببند و ترکیب آن‌ها انجام شده است. مهم‌ترین نتایج حاصل از این بررسی در زیر ارائه شده است. با افزایش طول بلانکت، میزان نشت از بستر سد خاکی روند کاهشی خواهد داشت. تأثیر طول بلانکت بر درصد کاهش نشت وابسته به نفوذپذیری بستر بوده و با افزایش نفوذپذیری، طول مؤثر بر کاهش نشت افزایش خواهد یافت. بررسی‌های انجام‌شده نشان داد طول مؤثر بلانکت رسی با نفوذپذیری  $10^{-6}$  و  $10^{-7}$  متر بر ثانیه بستر با هر ضخامت بلانکت به ترتیب 100 و 200 متر هستند. همچنین ضخامت مؤثر بلانکت بر درصد کاهش نشت، بین 0/5 تا 1 متر تعیین شده است. استفاده از دیوار آببند با ضخامت‌های متفاوت منجر به افزایش درصد کاهش نشت از بستر سد شده است. البته نتایج نشان داده است دیوار آببند با ضخامتی در محدوده 0/4 تا 0/8 متر بیشترین

بازدهی را داشته است. همچنین با افزایش ارتفاع دیوار آب‌بند، درصد کاهش نشست افزایش یافته و این روند برای ارتفاع بیش از  $0/8$  عمق بستر بسیار قابل توجه بوده است. علاوه بر این، اجرای زاویه‌دار دیوار آب‌بند به علت ایجاد عرض کانال نشست بزرگ‌تر نسبت به حالت قائم در بستر، تأثیر منفی بر درصد کاهش نشست خواهد داشت.

اجرای دیوار آب‌بند به همراه بلانکت، تأثیر قابل توجهی بر درصد کاهش نشست از پی سد خاکی به همراه خواهد داشت. بر این اساس، اجرای بلانکت رسی به همراه دیوار آب‌بند به ارتفاع  $d=h$  و برای بستر با نفوذپذیری  $10^{-4}$  و  $10^{-3}$  متر بر ثانیه به ترتیب باعث کاهش بیش از  $40$  و  $80$  درصدی نشست خواهد شد. همچنین اجرای دیوار آب‌بند در زیر هسته رسی بیشترین تأثیر را بر درصد کاهش نشست نسبت به محل‌های دیگر در بالادست سد داشته است.

## منابع

- 1- توکلی، ا.؛ قربانی، ب.؛ رادفر، م.؛ صمدی بروجنی، ح.؛ قهرمان، ب. (1395)، «اصلاح معادلات تجربی برآورد نشت با استفاده از تشابه ابعادی (کانال خاکی بلداجی، استان چهارمحال و بختیاری)»، نشریه حفاظت منابع آب و خاک (علمی - پژوهشی)، شماره 6 (2)، صص 105-120.
- 2- شهرکی، س.؛ اژدری مقدم، م. (1392)، «بررسی موقعیت قرارگیری دیواره آب‌بند نسبت به محور سد بر دبی و سرعت نشت، تنش و فشار آب منفذی؛ مطالعه موردی سد سارادان»، هفتمین کنگره ملی مهندسی عمران، زاهدان، دانشگاه سیستان و بلوچستان.
- 3- Bennett, P. T. (1946), "The effect of blanket on seepage through pervious foundation," *ASCE Transactions*, 3, pp. 52-61.
- 4- Fakhari, A. & Ghanbari, A. (2013), "A simple method for calculating the seepage from earth dams with clay core," *Journal of Geo Engineering*, TGS, 8 (1), pp. 27-32.
- 5- Ghanbari, A., & Zaryabi, S. (2014), "A Simple Method for Calculating the Seepage at the Foundation of Embankment Dams with Blanket and Clay Trench", *Journal of GeoEngineering*, 9 (1), pp. 21-32.
- 6- Goharnejad, H., Noury, M., Noorzad, A., Shamsaie, A., and Goharnejad A. (2010), "The effect of clay blanket thickness to prevent seepage in dam reservoir," *International Journal of Environmental Sciences*, 4 (6), pp. 556-565.
- 7- Mansuri, B., Salmasi, F., & Oghati, B. (2014), "Effect of location and angle of cutoff wall on uplift pressure in diversion dam", *Geotechnical and Geological Engineering*, 32 (5), pp. 1165-1173.
- 8- Rezk, M. A. E. R. M., & Senoon, A. E. A. A. (2011), "Analytical solution of seepage through earth dam with an internal core", *Alexandria Engineering Journal*, 50 (1), pp. 111-115.
- 9- SEEP/W (2012), *Seepage Modeling with SEEP/W*, Geo-Slope International Ltd, Calgary.
- 10- Terzaghi, K. (1943), *Theory of consolidation*, John Wiley & Sons, Inc.
- 11- USACE. (2004), "Seepage Control", EM 1110-2-2300, US Army Corps of Engineers, Washington DC, US.
- 12- USBR. (1987), "Embankment Dams", Chapter 5, Seepage Analysis, US Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Washington DC, US.