



## بررسی تأثیر گرادیان جریان خروجی بر پدیده جوشش در شیب‌های ساحلی تحت نوسان‌های تراز آب با حضور دیوار آب‌بند

قربان مهتایی\* و یاسر مهری\*\*

\* نگارنده مسئول: گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی دانشگاه زنجان، زنجان، ایران. تلفن: ۰۲۴)۳۳۰۵۲۳۴۸،

پیم‌نگار: ghmahtabi@gmail.com

\*\* به‌ترتیب: استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی دانشگاه زنجان؛ و دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب

پردیس ابوریحان دانشگاه تهران

تاریخ دریافت: ۹۴/۱۲/۱؛ تاریخ پذیرش: ۹۵/۵/۱۷

### چکیده

یکی از دلایل اصلی تخریب شیب‌های ساحلی و کناره رودخانه‌ها، وقوع پدیده جوشش در سطوح شیب‌دار، پس از بالا آمدن سطح آب زیرزمینی و در زمان نزول سطح آب کانال است. در این پژوهش، تأثیر تغییرات سطح آب زیرزمینی و سطح آب کانال (شرایط اوج و فروکش سیلاب) بر وقوع جوشش در شیب‌های ساحلی و نیز اثر دیوار آب‌بند بر این پدیده در شرایط مذکور بررسی شده است. آزمایش‌ها در تانک نشست با مدل فیزیکی یک مقطع ذوزنقه‌ای با شیب دیواره ۱/۵ و قطر متوسط ذرات ۰/۵۸ میلی‌متر اجرا شد. دیوار آب‌بند در عمق‌های نسبی (Z/d) برابر ۰/۵، ۰/۶۷، ۰/۸۳ و ۱ نصب گردید (Z عمق دیوار آب‌بند و d عمق کانال). در شرایط اوج سیلاب (صعود تراز سطح ایستابی) و در آزمایش شاهد در همه عمق‌های نسبی آب کانال به غیر از عمق نسبی (y/d) برابر ۰/۷، پدیده جوشش مشاهده شده است. در آزمایش دیوار آب‌بند با عمق نسبی (Z/d) برابر ۱، در حالت وقوع نیافتن پدیده جوشش، گرادیان خروجی نسبت به نمونه شاهد تقریباً ۴۱ درصد کاهش نشان می‌دهد و جوشش صرفاً در عمق نسبی آب (y/d) برابر ۰/۱۶۷ مشاهده می‌شود. در شرایط فروکش سیلاب (نزول سطح آب کانال)، نتیجه بررسی‌ها نشان می‌دهد که در تمام ترازهای سطح ایستابی جوشش اتفاق افتاده است. در آزمایش‌های دیوار آب‌بند، در نمونه‌های با تراز سطح ایستابی بالا، با وجود نصب دیوار آب‌بند، افزایش گرادیان جریان خروجی ناشی از افزایش بار هیدرولیکی سبب وقوع جوشش در تمام نمونه‌ها شده است به طوری که در عمق نسبی آب زیرزمینی (h/d) برابر ۰/۹۳۳، در تمامی عمق‌های دیوار آب‌بند، جوشش اتفاق افتاده است.

### واژه‌های کلیدی

صعود سطح ایستابی، فشار آب منفذی، نزول آب کانال

### مقدمه

شیب‌های ساحلی با خاک‌هایی با نفوذپذیری بالا و کم، متفاوت است. در خاک‌های با نفوذپذیری زیاد، در اثر صعود سطح ایستابی یا نزول سطح آب کانال، فشار آب منفذی به‌طور یکنواخت کاهش می‌یابد و از بین می‌رود. ولی در خاک‌های با نفوذپذیری کم، فشار آب منفذی با تغییرات سطح آب داخل کانال یا سطح ایستابی با تغییر

یکی از اصول مهم در طراحی خاکریز کناره‌های رودخانه و شیب‌های ساحلی، حفاظت سطوح شیب‌دار است. در سواحل و رودخانه‌ها، سطح ایستابی و سطح آب درون مجرا در شرایط اوج و فروکش سیلاب ممکن است نوسان‌های شدید داشته باشد. تأثیر این شرایط در تخریب

خاکریزها، بدنه کانال‌ها و سدهای خاکی و همچنین کنترل تخریب سطوح شیب‌دار بررسی‌هایی کرده‌اند. کتیب (Katibe, 2004) نشت از کانال‌های پوشش‌دار همراه با زهکش‌های نامتقارن در حالت ماندگار را با روش المان‌های محدود بررسی کرد و نشان داد زمانی که فاصله زهکش‌ها زیاد است، کارایی پوشش کانال در کاهش نشت کم می‌شود و با کاهش نفوذپذیری پوشش کانال، نشت از کانال نیز کاهش می‌یابد. بریلجن (Berilgen, 2006) پایداری شیب در حین پایین‌افتادگی سطح آب را بررسی کرد. در این پژوهش پایین‌افتادگی آرام، سریع و انتقالی (گذرا) با سرعت‌های مختلف و مقادیر متفاوت هدایت هیدرولیکی خاک در شیب بررسی شد. وی عامل‌های زیادی را در ارتباط با شرایط باربرداری بررسی کرد و نتایج آنالیز نشت با المان‌های محدود را ارائه داد. عفیفی (Afifi, 2006) با نرم‌افزار Seep/W به بررسی عوامل مؤثر بر کارایی دیوار آب‌بند در کاهش نشت از زیر سدهای خاکی پرداخت. نتایج بررسی‌های وی نشان داد که در ۱۰ درصد ابتدا و انتهای مقطع پی، با دور شدن از سراب و پایاب، دبی نشت افزایش می‌یابد اما در قسمت میانی ثابت است.

اشنلمن و همکاران (Schnellmann *et al.*, 2010) برای مطالعه اثر سطح ایستابی بر شیب‌های خاکی، یک مدل فیزیکی ارائه دادند و اثر بالا آمدن سطح آب در خاک در شیب‌های غیراشباع را به صورت آزمایشگاهی و عددی بررسی کردند. نتایج بررسی‌های این محققان نشان داد که یک واکنش تأخیری در فشار آب منفذی در ناحیه غیراشباع وجود دارد که ناشی از بالا آمدن سطح آب است. چن و هوانگ (Chen & Huang, 2011) با بررسی پایداری شیب کناری تحت شرایط آبیگری و پایین‌افتادگی سطح آب مخزن می‌گویند پایین‌افتادگی سریع آب باعث ایجاد فشار ایستابی در جهت شیب کناری می‌شود. لوپز آکوستا و همکاران (Lopez-Acosta *et al.*, 2013) تخریب یک

یکسان روبه‌رو نمی‌شود و مشکلاتی از جهت تخریب سطوح به وجود می‌آورد. یکی از عوامل مؤثر در وقوع پدیده جوشش در شیب‌های ساحلی، نیروی برشی است که با تنش مؤثر کنترل می‌شود. تنش مؤثر به صورت تفاضل تنش کل و فشار آب منفذی تعریف می‌شود. در شرایط اوج سیلاب، با تغذیه آب زیرزمینی و بالا آمدن سطح ایستابی، فشار آب منفذی افزایش می‌یابد. در این شرایط با توجه به رابطه تنش کل، تنش مؤثر کاهش یافته و به تبع آن مقاومت برشی خاک نیز کاهش می‌یابد و باعث وقوع پدیده جوشش در شیب‌های ساحلی می‌شود. بنابراین، فشار آب منفذی در وقوع جوشش در سطوح شیب‌دار نقشی مهم دارد (Anon, 1973).

در شرایط فروکش سیلاب هم‌زمان با پایین افتادن سطح آب کانال، زمانی که سطح ایستابی به علت تغذیه در اطراف کانال بالاست، شیب‌های ساحلی در معرض فشار خارجی ناشی از تخلیه آب زیرزمینی قرار می‌گیرند. این موضوع، همان‌طور که اشاره شد در خاک‌های ریزدانه به دلیل ظرفیت نگهداری زیاد آب و فشار آب منفذی بالا، تأثیر نمایان‌تری دارد. در این شرایط، پدیده جوشش در شیب‌های ساحلی در اثر اختلاف فشار ایستابی به وجود می‌آید. همچنین، زمانی که سطح آب در کانال به‌طور ناگهانی افت می‌کند، به دلیل اشباع بودن بدنه کانال در تراز بالاتر، فشار آب منفذی منفی ایجاد و افزایش تنش مؤثر باعث وقوع پدیده جوشش در شیب‌های ساحلی یا رودخانه می‌شود (Chu-Agor *et al.*, 2008).

به منظور پیشگیری از تخریب سطوح شیب‌دار در تماس با آب، روش‌های مختلف وجود دارد که از آن جمله می‌توان به استفاده از سنگ‌چین، پوشش گیاهی، ترانشه، توری‌سنگ، تشک بتنی، مخلوط سیمان و خاک، دیوار حایل و زهکش افقی یا قائم اشاره کرد (Gopinathan, 1996). محققان در مورد نشت آب از

## مواد و روش‌ها

### معادلات حاکم و آنالیز ابعادی

جریان آب در خاک‌های اشباع و غیراشباع را می‌توان با معادله داری بررسی کرد. طبق قانون داری، دبی جریان عبوری در واحد عرض مقطع ( $q$ ) از توده‌ای خاک متناسب است با گرادیان جریان که می‌توان آن را به صورت رابطه ۱ بیان کرد (Fredlund & Rehardjo, 1993):

$$q = k_w A \frac{\partial h_w}{\partial x} \quad (1)$$

که در آن،

$k_w$  = ضریب نفوذپذیری (متر بر ثانیه)؛  $A$  = سطح مقطع جریان (متر مربع)؛ و  $\partial h_w / \partial x$  = گرادیان جریان در جهت  $x$ . بار هیدرولیکی کل به صورت رابطه ۲ بیان می‌شود:

$$h_w = z + \frac{u_w}{\rho_w g} \quad (2)$$

که در آن،

$u_w$  = فشار آب منفذی (نیوتن بر مترمربع)؛  $\rho_w$  = چگالی آب (کیلوگرم بر مترمکعب)؛  $g$  = شتاب ثقل (متر بر مجذور ثانیه)؛ و  $z$  = ارتفاع نسبت به سطح مقایسه (متر).

هدف این تحقیق بررسی تأثیر گرادیان جریان خروجی بر پدیده جوشش در شیب‌های ساحلی تحت نوسان‌های تراز آب با حضور دیوار آب‌بند است. بر اساس نظر اسمیت (Smith, 1985)، برای محاسبه گرادیان جریان در دیوار آب‌بند از روش لین استفاده می‌شود. بر اساس این روش، گرادیان جریان ( $\partial h_w / \partial x$ ) به صورت رابطه ۳ محاسبه می‌گردد:

$$\frac{\partial h_w}{\partial x} = \frac{\Delta H}{L} = \frac{h - y}{L_v + \frac{1}{3} L_H} \quad (3)$$

که در آن،

$\Delta H$  = اختلاف عمق آب زیرزمینی و کانال (متر)؛  $L$  = مجموع طول خط جریان (متر)؛  $h$  = عمق آب

خاکریز همگن تحت پدیده افت سریع آب را با تحلیل تراوش گذرا در محیط اشباع/غیراشباع با مدل عددی بررسی و برای نشان دادن اهمیت تحلیل تراوش گذرا و بررسی فشار آب منفذی بر تخریب خاکریز، به سه حالت کلی پدیده تخلیه آرام، سریع و انتقالی (گذرا) تأکید کردند. فرسادی‌زاده و همکاران (Farsadizadeh *et al.*, 2014) با بررسی تأثیر دیوار آب‌بند بر پدیده جوشش شیب جانبی در شرایط اوج سیلاب (تغذیه آب زیرزمینی)، به این نتیجه رسیدند که سطح نشت و فشار پیرومتریک نزدیک سطح خاک دو عامل مهم در تخریب شیب جانبی کانال خاکی هستند. بهروزی‌نیا و همکاران (Behrouzinia *et al.*, 2015) با استفاده از مدل عددی  $Slope/w$  و  $Seep/w$  ویژگی‌های هیدرودینامیکی غیراشباع را بر میزان تراوش و تخریب شیب بالادست سد خاکی همگن در اثر تخلیه سریع مخزن بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که در حالت رطوبت اشباع، حالت بحرانی شیب بالادست در شرایط مخزن نیمه‌پر و تخلیه نصف تراز آب مخزن اتفاق می‌افتد. همچنین با کاهش رطوبت ناحیه غیراشباع و کمتر شدن قابلیت زهکشی خاک، ضرایب اطمینان حالت بحرانی در نزدیکی تخلیه کامل بروز می‌کند و به‌طور کمی در شرایطی است که  $\frac{2}{3}$  تراز آب مخزن تخلیه شده باشد.

هدف این تحقیق بررسی عملکرد دیوار آب‌بند به‌عنوان راهکاری پیشگیرانه برای جلوگیری از وقوع پدیده جوشش در شیب‌های ساحلی ماسه‌ای در شرایط نوسان‌های سطح ایستابی و کانال (شرایط اوج و فروکش سیلاب) است. به سخنی دیگر، فرض بر این است که دیوار آب‌بند بتواند با تأثیر بر گرادیان جریان خروجی، پدیده جوشش را در شرایطی کنترل کند که تراز آب نوسان دارد. برای این منظور با استفاده از مدل آزمایشگاهی، تأثیر گرادیان جریان خروجی بر پدیده جوشش در شیب‌های ساحلی تحت نوسان‌های تراز آب با حضور دیوار آب‌بند بررسی شد.

یادآوری می‌شود که اگر پدیده جوشش رخ ندهد پارامتر  $\frac{p}{d}$  در نتایج ارائه نمی‌شود. با در نظر گرفتن پارامترهای بی‌بعد به دست آمده، آزمایش‌های این تحقیق در دو حالت صعود تراز سطح ایستابی (اوج سیلاب) و نزول تراز سطح آب (فروکش سیلاب) اجرا شد.

### مدل فیزیکی

آزمایش‌های این تحقیق روی تانک نشست موجود در گروه مهندسی آب دانشگاه زنجان اجرا شد که شامل یک محفظه از جنس پلکسی گلاس به ارتفاع ۶۰، عرض ۱۰ و طول ۱۵۰ سانتی‌متر و بخش مرکزی آن به طول ۱۰۵ سانتی‌متر محل اجرای مدل شیب خاکی است. آب مورد استفاده در این آزمایش‌ها با یک پمپ با قدرت ۴ کیلووات از یک مخزن با حجم مفید ۱۰۰ لیتر تامین می‌شود که در زیر دستگاه تعبیه شده است. عمق آب در دو طرف مدل خاک با دو لوله قائم از جنس پلکسی گلاس کنترل می‌شود که ارتفاع آنها قابل تغییر است؛ آب زهکشی شده دوباره به مخزن پایین تخلیه می‌شود. در شکل ۱، نمایی از تانک نشست و سطح شیب‌دار ارائه شده است.

زیرزمینی (متر)؛  $y$  = عمق آب کانال (متر)؛  $L_V$  = مجموع طول افقی جریان (متر)؛ و  $L_H$  = مجموع طول عمودی خط جریان (متر). در این تحقیق از رابطه ۳ برای محاسبه گرادیان جریان استفاده شده است. به منظور بررسی تأثیر گرادیان جریان خروجی بر وقوع پدیده جوشش در سطوح شیب‌دار تحت نوسان‌های سطح آب با حضور پرده آب‌بند، پارامترهای دخیل در آزمایش‌های تحقیق را می‌توان به صورت رابطه ۴ بیان کرد:

$$f(h, d, y, z, p, L) = 0 \quad (4)$$

که در آن،

$h$  = عمق آب زیرزمینی (متر)؛  $d$  = عمق کانال (متر)؛  $y$  = عمق آب کانال (متر)؛  $Z$  = عمق دیوار آب‌بند (متر)؛  $L$  = مجموع طول خط جریان (متر)؛ و  $p$  = موقعیت یا عمق سطح جوشش نسبت به کف کانال (متر). با استفاده از تحلیل ابعادی به روش  $\pi$ -باکینگهام و لحاظ کردن رابطه ۳، رابطه فوق به شکل رابطه ۵ ارائه شد:

$$\frac{\Delta H}{L} = \frac{h - y}{L_V + \frac{1}{3}L_H} = f\left(\frac{h}{d}, \frac{y}{d}, \frac{p}{d}, \frac{z}{d}\right) \quad (5)$$



شکل ۱- تانک نشست به همراه مدل فیزیکی سطح شیب‌دار

بررسی تأثیر گرادیان جریان خروجی بر پدیده جوشش...

## آزمایش‌های مقدماتی

ضریب آبگذری با آزمایش بار افتان و با رساندن خاک به تراکم بهینه به دست آمد و از آزمایش برش مستقیم برای تعیین ضریب چسبندگی نمونه خاک استفاده شد. در جدول ۱ مشخصات فیزیکی خاک مورد استفاده ارائه شده است.

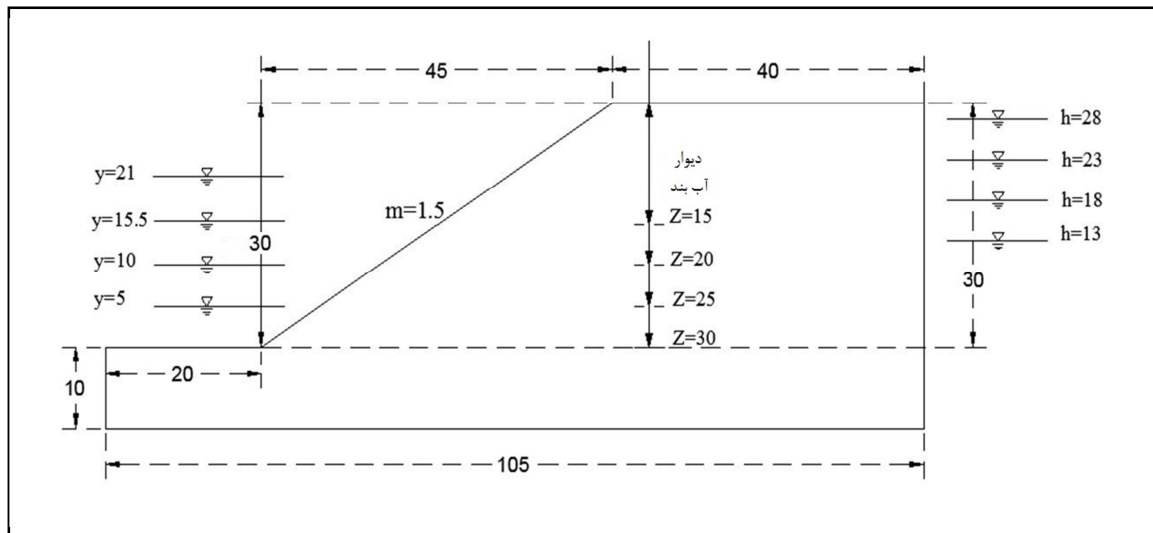
برای تعیین منحنی دانه‌بندی، آزمایش دانه‌بندی با روش الک به کار گرفته شد. برای تعیین رطوبت و انرژی بهینه تراکم از آزمایش پروکتور استاندارد استفاده شد.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی خاک مورد استفاده

چسبندگی (کیلوگرم بر سانتی متر مربع)	رطوبت بهینه (درصد)	ضریب یکنواختی (بی بعد)	ضریب آبگذری (متر بر ثانیه)	چگالی مستغرق (کیلوگرم بر سانتی متر مکعب)	زاویه ایستایی (درجه)	قطر متوسط (میلی متر)
۰/۰۲۱	۸/۷۳	۴/۶	۰/۰۰۰۱۸	۱۹۸۱/۹	۳۹/۶	۰/۵۸

نشان‌دهنده عمق سطح آب کانال است. با توجه به اینکه عمق سطح ایستایی در دو طرف کانال یکسان و نشأت از کانال نسبت به محور مرکزی آن متقارن است، بنابراین در این تحقیق نصف مقطع عرضی کانال مدل گردید.

شکل ۲ تصویر کلی از مدل سطح شیب‌دار و ابعاد آن را به همراه مقادیر عمق سطح آب کانال (y) و عمق آب زیرزمینی (h) به کار رفته در آزمایش‌ها نشان می‌دهد. بخش سمت راست شکل نشان‌دهنده عمق سطح ایستایی در حین آزمایش‌ها و بخش سمت چپ



شکل ۲- تصویر مدل سطح شیب‌دار همراه با ابعاد اجزا آن و پارامترهای آزمایش‌ها (ابعاد به سانتی متر)

و ضریب آبگذری در مدل با لایه‌هایی به ضخامت ۱۰ سانتی متر متراکم گردید تا به ارتفاع حداکثر یعنی ۴۰ سانتی متر نسبت به تراز کف برسد. با برش زدن خاک

## آزمایش‌های اصلی

در ابتدا لایه‌های خاک به رطوبت بهینه رسانده شد و پس از آن با همان انرژی تراکم در آزمایش تراکم استاندارد

در شرایط نزول سطح آب کانال، برای ایجاد اختلاف بار، ابتدا سطح ایستابی پشت خاکریز روی عمق مورد نظر تنظیم شد و پس از آن سطح آب کانال با سرعت حدود ۳ میلی‌متر در ثانیه پایین آورده شد. در مواردی که تخریب اتفاق می‌افتاد، عمق سطح آب کانال (y) در لحظه تخریب و عمق وقوع جوشش ثبت می‌شد. پس از هر بار تخریب، مدل سطح شیب‌دار بازسازی می‌شد تا برای آزمایش بعدی آماده شود. به‌منظور کنترل سطح آب زیرزمینی و آب درون کانال نیز از لوله‌های PVC کناری مدل تانک نشت استفاده شد که قابلیت جابه‌جایی در جهت قائم را داشتند. شکل‌های ۳ و ۴ یک نمونه از سطح شیب‌دار پیش و پس از وقوع پدیده جوشش را نشان می‌دهد.

در مرحله دوم، آزمایش‌ها با نصب دیوار آب‌بند اجرا شد. برای کنترل تخریب، دیوار آب‌بند با اعماق مختلف استفاده شد تا حالت بهینه انتخاب شود. دیوار آب‌بند در عمق‌های نصب (Z) برابر ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ سانتی‌متری قرار داده شد. با در نظر گرفتن ۴ عمق مختلف برای شرایط صعود سطح آب زیرزمینی و نزول سطح آب کانال، در مجموع ۳۲ حالت بررسی شد که با ۲ بار تکرار، در مجموع ۶۴ آزمایش اجرا گردید. در شکل ۲، مقادیر پارامترهای مورد آزمایش در این پژوهش نشان داده شده است.

اضافه، مقطع شیب‌دار و کف افقی مدل مطابق شکل ۲ ایجاد شد. برای اجرای دیوار آب‌بند از یک صفحه از جنس پلکسی‌گلاس به ضخامت ۴ میلی‌متر استفاده شد. از آنجا که نسبت ضخامت صفحه به طول مدل کوچک است، این صفحه دیوار آب‌بند در نظر گرفته می‌شود. پس از هر آزمایش برای تغییر عمق نفوذ دیوار آب‌بند خاک تا زیر مدل شیشه‌ای تخلیه و پس از جابه‌جایی دوباره خاک متراکم شد (شکل ۲).

آزمایش‌های این پژوهش در دو مرحله اجرا شد. در مرحله ابتدایی، چهار آزمایش شاهد برای شرایط صعود سطح آب ایستابی (اوج سیلاب) و چهار آزمایش برای شرایط نزول سطح آب کانال (فروکش سیلاب) اجرا شد. برای حصول اطمینان از نتایج تحقیق، هر آزمایش به‌طور متوسط ۲ بار نیز تکرار شد که در مجموع ۱۶ آزمایش انجام گرفت. در شرایط صعود سطح آب ایستابی، برای ایجاد اختلاف بار، ابتدا سطح آب در کانال به عمق مورد نظر رسانده شد. پس از آن سطح ایستابی به آرامی و با سرعت بسیار کم (در حدود ۱ میلی‌متر در ثانیه) بالا آورده شد تا خاک فرصت کافی برای اشباع شدن داشته باشد. در حین آزمایش و در مواردی که پدیده جوشش اتفاق می‌افتاد، عمق سطح آب زیرزمینی (h) لحظه تخریب و عمق وقوع جوشش سطح شیب‌دار ثبت می‌شد.



شکل ۴- نمونه سطح شیب‌دار تخریب شده



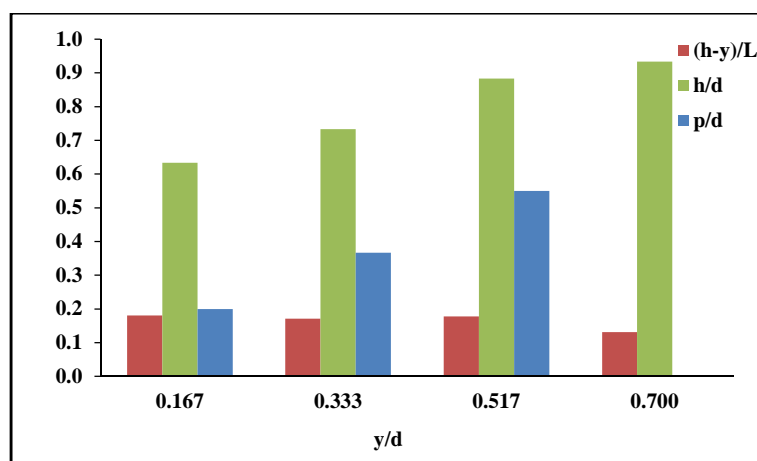
شکل ۳- نمونه سطح شیب‌دار سالم

## نتایج و بحث

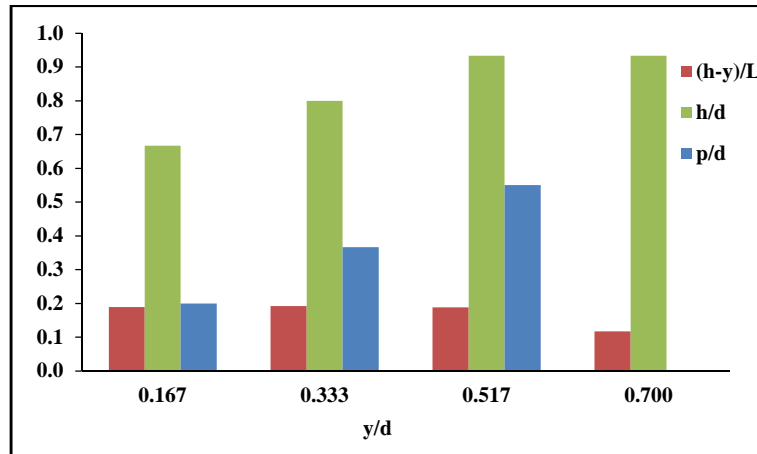
### شرایط صعود سطح ایستابی (اوج سیلاب)

شکل‌های ۵ تا ۹ تغییرات گرادیان جریان خروجی  $(h-y/L)$ ، عمق نسبی آب زیرزمینی  $(h/d)$  و عمق نسبی وقوع جوشش  $(p/d)$  را به‌ازای مقادیر عمق نسبی آب کانال  $(y/d)$  در مدل‌های آزمایش نشان می‌دهد. در آزمایش شاهد (شکل ۵)، در همه مقادیر عمق نسبی آب کانال  $(y/d)$  (به‌جز  $y/d=0/7$ )، جوشش مشاهده شد که با بررسی‌های فرسادی‌زاده و همکاران (Farsadizadeh *et al.*, 2014) در خصوص پدیده جوشش در سطح شیب‌دار مشابه است. مقدار متوسط گرادیان وقوع جوشش در آزمایش‌های شاهد، حدود  $0/177$  به‌دست آمد. در آزمایش دیوار آب‌بند با عمق نسبی  $Z/d=0/5$  (شکل ۶)، وضعیت تخریب سطح شیب‌دار مشابه حالت شاهد است. در این آزمایش، در حالتی که جوشش (عمق نسبی آب کانال  $y/d=0/7$ ) رخ نمی‌دهد، مقدار گرادیان جریان خروجی

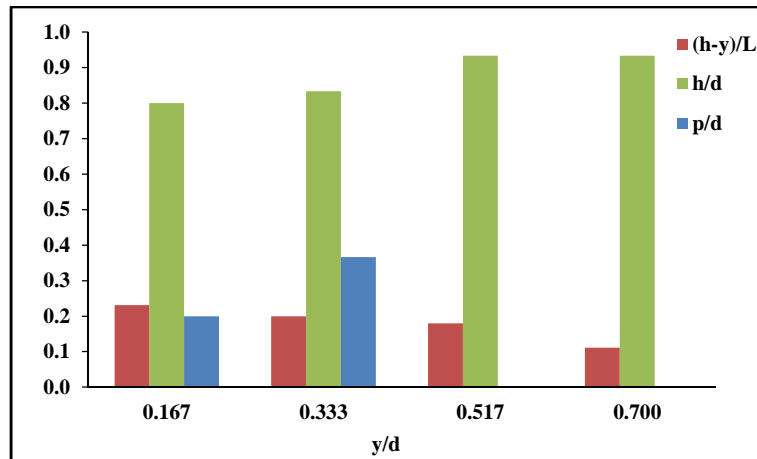
نسبت به حالت شاهد در حدود ۱۱ درصد نشان می‌دهد. در دو آزمایش دیوار آب‌بند با عمق نسبی  $(Z/d)$  برابر  $0/67$  و  $0/83$ ، شرایط تقریباً یکسان است یعنی وقوع پدیده جوشش در دو عمق نسبی آب کانال  $(y/d)$  برابر  $0/167$  و  $0/333$  مشاهده می‌شود (شکل ۷ و ۸). مقدار گرادیان وقوع جوشش در این دو آزمایش به‌ترتیب  $0/215$  و  $0/23$  ( $Z/d=0/67$  و  $Z/d=0/83$ ) به‌دست آمده است که نسبت به نمونه شاهد ۲۲ تا ۳۰ درصد افزایش نشان می‌دهد. در تمامی آزمایش‌ها با افزایش عمق نسبی آب کانال، مقادیر گرادیان جریان خروجی کاهش نشان داد. در آزمایش دیوار آب‌بند با عمق نسبی  $Z/d=1$  (شکل ۹)، جوشش در سطح شیب‌دار صرفاً در عمق نسبی آب کانال برابر  $y/d=0/167$  مشاهده می‌شود. در این نمونه، وقتی جوشش اتفاق نمی‌افتد، حداکثر مقدار کاهش گرادیان جریان خروجی نسبت به نمونه شاهد حدود ۲۳ درصد است.



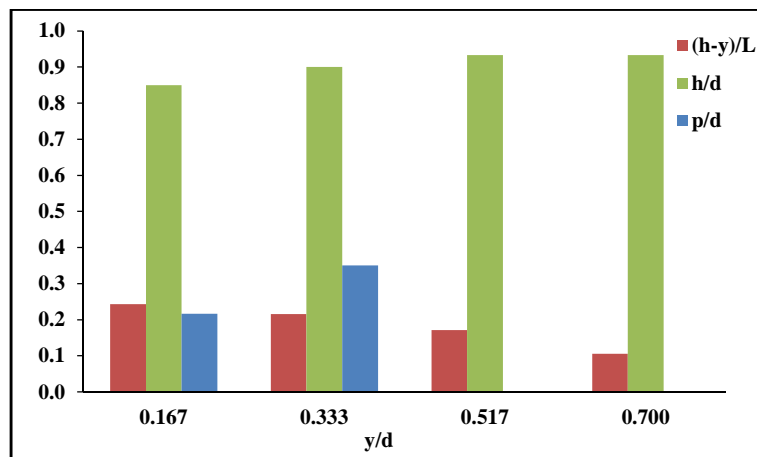
شکل ۵- تغییرات گرادیان جریان خروجی، عمق نسبی آب زیرزمینی و عمق نسبی وقوع جوشش به‌ازای عمق نسبی آب کانال در آزمایش شاهد



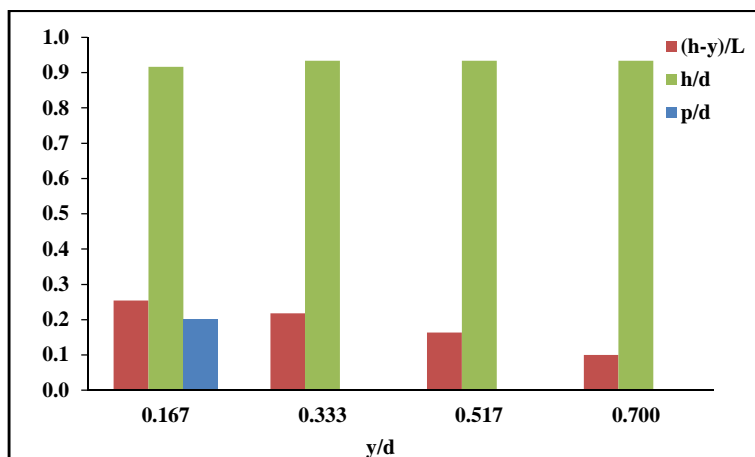
شکل ۶- تغییرات گرادیان جریان خروجی، عمق نسبی آب زیرزمینی و عمق نسبی وقوع جوشش به ازای عمق نسبی آب کانال در آزمایش با دیوار آب‌بند  $Z/d = 0.5$



شکل ۷- تغییرات گرادیان جریان خروجی، عمق نسبی آب زیرزمینی و عمق نسبی وقوع جوشش به ازای عمق نسبی آب کانال در آزمایش با دیوار آب‌بند  $Z/d = 0.67$



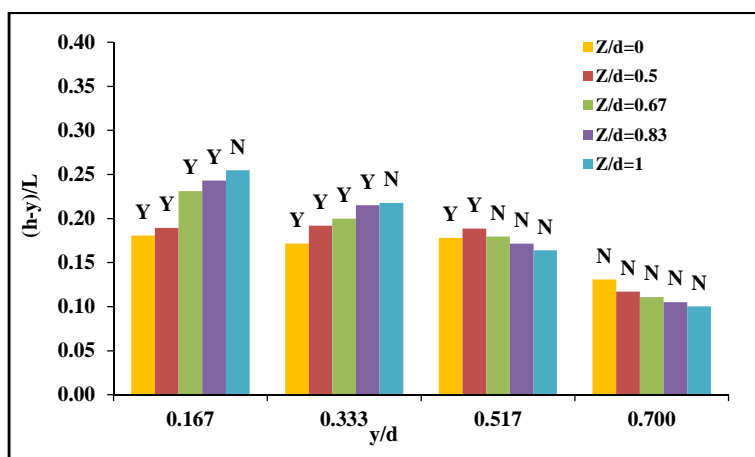
شکل ۸- تغییرات گرادیان جریان خروجی، عمق نسبی آب زیرزمینی و عمق نسبی وقوع جوشش به ازای عمق نسبی آب کانال در آزمایش با دیوار آب‌بند  $Z/d = 0.83$



شکل ۹- تغییرات گرادیان جریان خروجی، عمق نسبی آب زیرزمینی و عمق نسبی وقوع جوشش به ازای عمق نسبی آب کانال در آزمایش با دیوار آب بند  $Z/d=1$

در آزمایش شاهد (بدون دیوار آب بند) و تمامی مدل‌ها با دیوار آب بند، جوشش مشاهده نشد. در این مدل مشابه مدل قبلی، با افزایش عمق نسبی دیوار آب بند، گرادیان جریان خروجی کاهش یافت. نتایج نشان می‌دهد در شرایط وقوع سیلاب (صعود سطح ایستابی)، زمانی که عمق نسبی آب کانال به مقادیر حداکثر ( $y/d=0.7$ ) نزدیک می‌شود، به علت کم شدن گرادیان جریان خروجی، وقوع جوشش در سطح شیب‌دار به حداقل ممکن می‌رسد. وضعیت بحرانی در شرایط اوج سیلاب (صعود سطح ایستابی) زمانی است که با پایدار شدن جریان‌های سیلابی کم تا متوسط (عمق‌های پایین آب کانال) و تغذیه مداوم آب زیرزمینی، افزایش فشار آب منفذی و اختلاف بار هیدرولیکی عمق آب زیرزمینی و کانال موجب وقوع پدیده جوشش در شیب‌های ساحلی می‌شود. افزایش فشار آب منفذی، طبق نظر چواگور و همکاران (Chu-Agor et al., 2008)، مقاومت برشی را کاهش می‌دهد و نیروی گرادیان نشت موجب جابه‌جایی ذرات خاک می‌گردد.

به منظور مقایسه عملکرد دیوار آب بند با عمق‌های نصب مختلف، در شکل ۱۰ نتایج مقادیر گرادیان جریان خروجی به ازای عمق‌های نسبی آب کانال در شرایط صعود سطح ایستابی (اوج سیلاب) ارائه شده است. در این شکل، علامت  $Y$  نشان‌دهنده وقوع جوشش و علامت  $N$  نشان‌دهنده وقوع نیافتن جوشش است. در دو عمق نسبی آب کانال ( $y/d$ ) برابر  $0.167$  و  $0.333$ ، با وجود افزایش عمق دیوار آب بند، مقدار گرادیان جریان خروجی افزایش یافت. دلیل این مسئله تأثیر افزایش عمق آب زیرزمینی است. در این دو عمق آب کانال، در دیوار آب بند با عمق نسبی ( $Z/d$ ) برابر ۱، پدیده جوشش رخ نداد ولی در بقیه عمق‌ها جوشش مشاهده شد. در عمق نسبی آب کانال ( $y/d$ ) برابر  $0.517$ ، در دیوار آب بند با عمق نسبی ( $Z/d$ )  $0.67$  و بیشتر، پدیده جوشش رخ نداد. در این عمق آب کانال، با افزایش عمق نسبی دیوار آب بند، گرادیان جریان خروجی کاهش یافت که نشان می‌دهد دیوار آب بند به خوبی توانسته پدیده جوشش را کنترل کند. در عمق نسبی آب کانال ( $y/d$ ) برابر  $0.7$

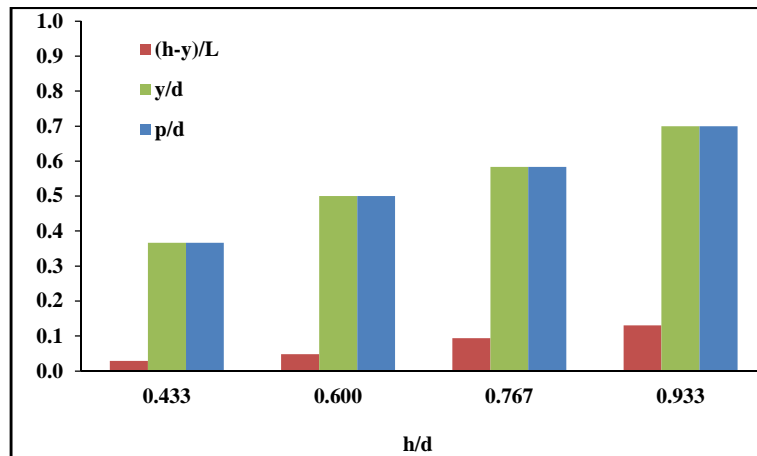


شکل ۱۰- تغییرات گرادیان جریان خروجی به‌ازای عمق نسبی آب کانال و عمق نسبی دیوار آب‌بند در شرایط صعود سطح ایستابی

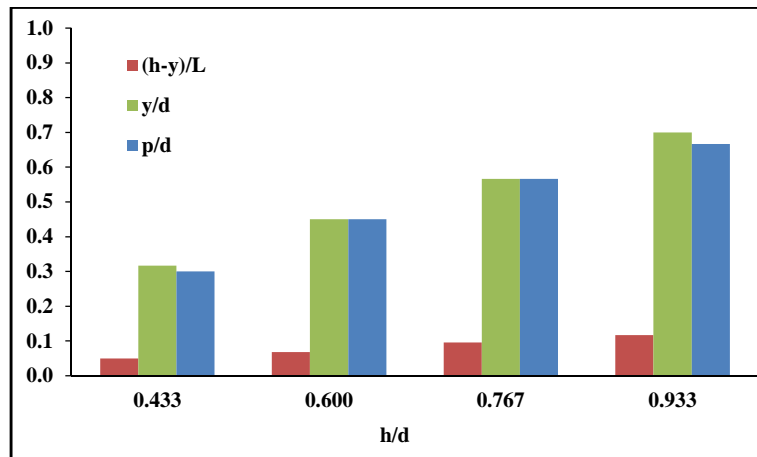
توجهی افزایش نشان می‌دهد (در حدود ۱/۶۷ برابر). در این نمونه‌ها با وجود افزایش طول خط جریان ناشی از افزایش عمق دیوار آب‌بند، افزایش بار هیدرولیکی ناشی از نزول سطح آب باعث افزایش گرادیان جریان خروجی شده، ضمن اینکه موقعیت وقوع جوشش در حدود ۴/۵ درصد بالاتر از عمق سطح آب کانال قرار گرفته است. در آزمایش دیوار آب‌بند با عمق نسبی (Z/d) برابر ۰/۸۳ (شکل ۱۴)، پدیده جوشش در دو عمق نسبی آب زیرزمینی بالا (h/d) یعنی ۰/۷۶۷ و ۰/۹۳۳ مشاهده می‌شود. در این نمونه‌ها عمق وقوع جوشش در حدود ۵/۸ درصد بالاتر از عمق سطح آب کانال قرار گرفته است. در آزمایش با دیوار آب‌بند برابر یک (Z/d= ۱) (شکل ۱۵)، جوشش سطح شیب‌دار صرفاً در بالاترین عمق نسبی آب زیرزمینی (یعنی ۰/۹۳۳ h/d) مشاهده می‌شود. موقعیت سطح جوشش نیز در حدود ۸/۷ درصد بالاتر از عمق سطح آب کانال قرار دارد.

شرایط نزول سطح آب کانال (فروکش سیلاب) شکل‌های ۱۱ تا ۱۵ تغییرات گرادیان جریان خروجی (h-y/L)، عمق نسبی آب کانال (y/d) و عمق نسبی وقوع جوشش (p/d) را به‌ازای مقادیر عمق نسبی آب زیرزمینی (h/d) در مدل‌های آزمایش نشان می‌دهد. در آزمایش شاهد (شکل ۱۱) در تمام عمق‌های نسبی آب زیرزمینی، پدیده جوشش اتفاق افتاده و با افزایش عمق آب زیرزمینی مقدار گرادیان وقوع جوشش افزایش یافته است. جوشش نیز در تمام نمونه‌ها تقریباً در همان عمق آب کانال رخ داده است. در آزمایش دیوار آب‌بند با عمق نسبی (Z/d) برابر ۰/۵ (شکل ۱۲)، وضعیتی مشابه با حالت شاهد مشاهده می‌شود یعنی در تمام نمونه‌ها جوشش اتفاق افتاده است. در آزمایش با دیوار آب‌بند Z/d= ۰/۶۷ (شکل ۱۳)، به غیر از عمق نسبی آب زیرزمینی (h/d) برابر ۰/۴۳۳، در بقیه عمق‌ها جوشش رخ داده است و مقادیر گرادیان جریان خروجی به‌طور قابل

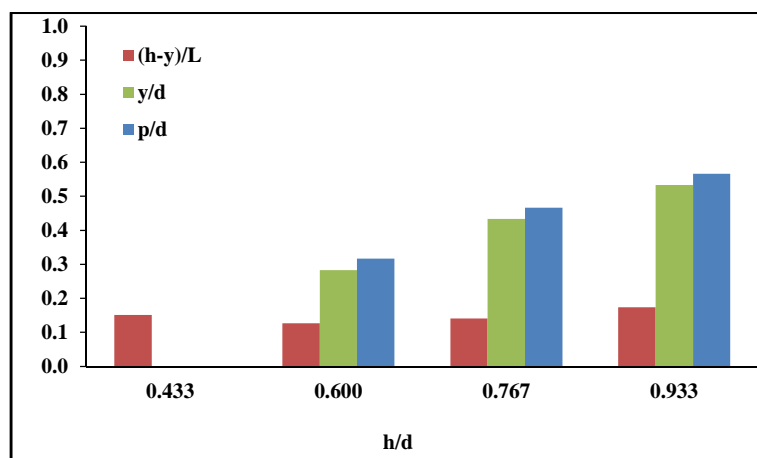
بررسی تأثیر گرادیان جریان خروجی بر پدیده جوشش...



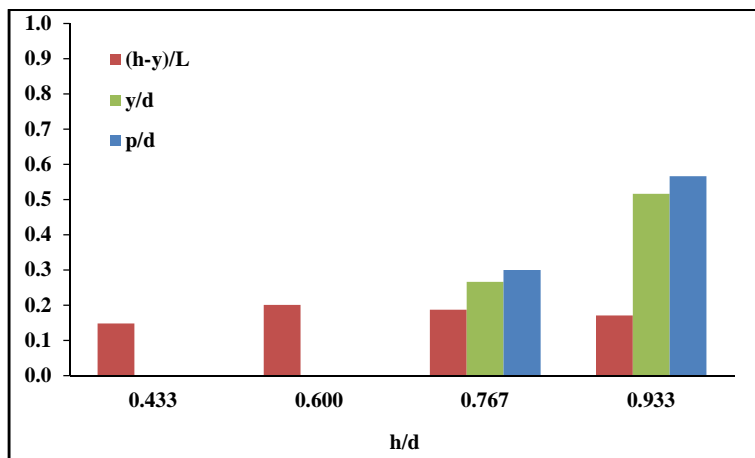
شکل ۱۱- تغییرات گرادیان جریان خروجی، عمق نسبی آب کانال و عمق نسبی وقوع جوشش به ازای عمق نسبی آب زیرزمینی در آزمایش شاهد



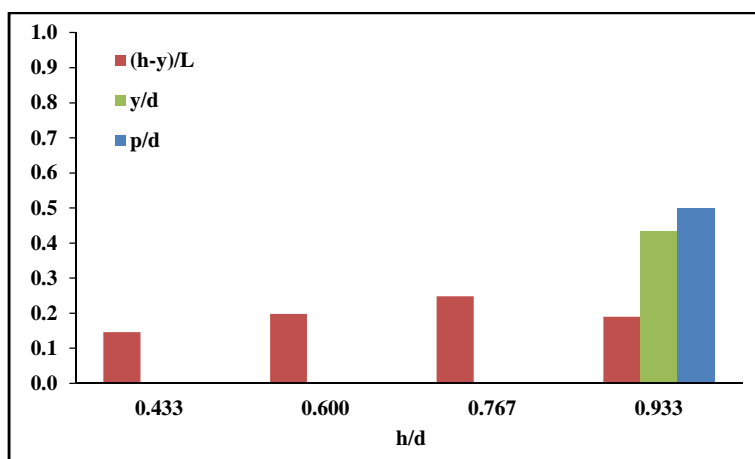
شکل ۱۲- تغییرات گرادیان جریان خروجی، عمق نسبی آب کانال و عمق نسبی وقوع جوشش به ازای عمق نسبی آب زیرزمینی در آزمایش با دیوار آب بند  $Z/d = +0.5$



شکل ۱۳- تغییرات گرادیان جریان خروجی، عمق نسبی آب کانال و عمق نسبی وقوع جوشش به ازای عمق نسبی آب زیرزمینی در آزمایش با دیوار آب بند  $Z/d = -0.67$



شکل ۱۴- تغییرات گرادیان جریان خروجی، عمق نسبی آب کانال و عمق نسبی وقوع جوشش به‌ازای عمق نسبی آب زیرزمینی در آزمایش با دیوار آب‌بند  $Z/d=0.83$



شکل ۱۵- تغییرات گرادیان جریان خروجی، عمق نسبی آب کانال و عمق نسبی وقوع جوشش به‌ازای عمق نسبی آب زیرزمینی در آزمایش با دیوار آب‌بند  $Z/d=1$

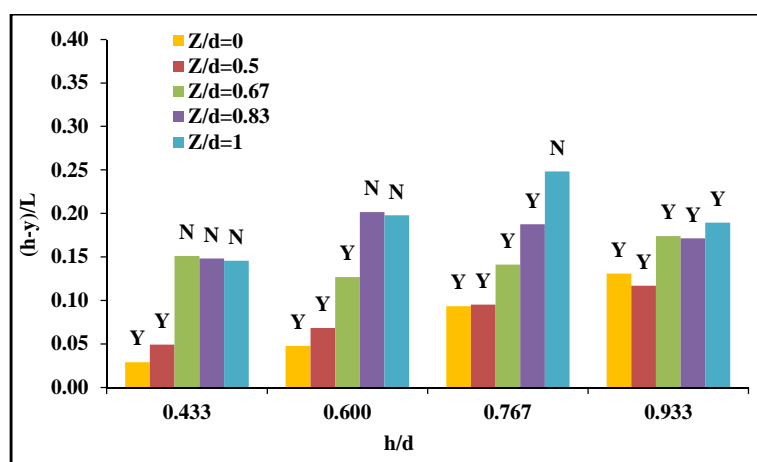
نمونه‌ها با وجود افزایش طول خط جریان ناشی از افزایش عمق دیوار آب‌بند، افزایش بار هیدرولیکی ناشی از نزول سطح آب، باعث افزایش گرادیان جریان خروجی شده است. در مدل با عمق نسبی آب زیرزمینی بالا ( $h/d=0.933$ )، این افزایش گرادیان جریان خروجی باعث وقوع جوشش در تمامی عمق‌های نصب دیوار آب‌بند شده است. بالا بودن عمق آب زیرزمینی باعث از بین رفتن عملکرد دیوار آب‌بند شده است. در شرایط فروکش سیلاب، سرعت زهکشی آب زیرزمینی کمتر از سرعت

به‌منظور مقایسه عملکرد دیوار آب‌بند با عمق‌های نصب مختلف، در شکل ۱۶ نتایج گرادیان جریان خروجی به‌ازای عمق نسبی آب زیرزمینی در شرایط نزول سطح آب کانال (فروکش سیلاب) ارائه شده است. در این شکل نیز، علامت Y نشان‌دهنده وقوع جوشش و علامت N نشان‌دهنده وقوع نیافتن جوشش است. مشاهده می‌شود در نمونه‌هایی که پدیده جوشش رخ داده است، در هر عمق آب زیرزمینی با افزایش عمق نصب دیوار آب‌بند، مقدار گرادیان جریان خروجی افزایش یافته است. در این

بررسی تأثیر گرادیان جریان خروجی بر پدیده جوشش...

کنند. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد در شرایط نزول سطح آب کانال (فروکش سیلاب)، حالت بحرانی آنگاه اتفاق می‌افتد که سطح آب زیرزمینی منطقه بالا باشد و با فروکش کردن سیلاب، به دلیل اشباع بودن بدنه کانال در تراز بالاتر، فشار آب منفذی منفی خواهد شد و افزایش تنش موثر باعث وقوع جوشش در سطح شیب‌دار ساحل یا رودخانه می‌شود (Anon, 1973).

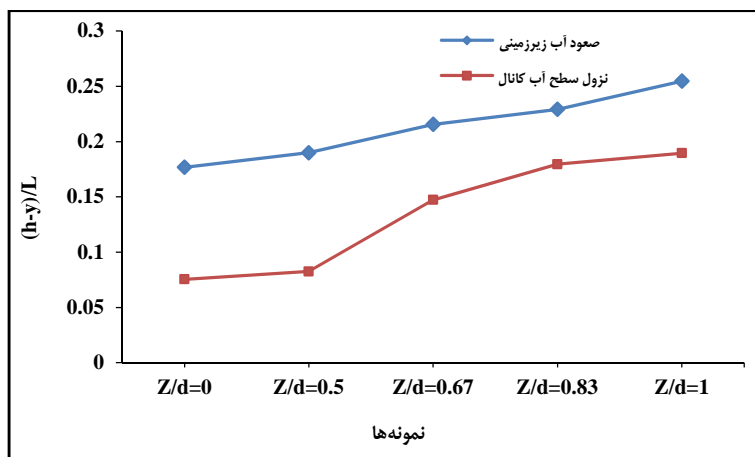
تخلیه آب کانال است، از این‌رو در اثر اختلاف فشار ایستایی به وجود آمده، پدیده جوشش اتفاق می‌افتد (Anon, 1973). در مقابل با کاهش عمق آب زیرزمینی، دیوار آب‌بند مانع از وقوع پدیده جوشش می‌شود، به طوری که در عمق نسبی آب زیرزمینی  $(h/d)$  برابر  $0/433$ ، دیوارهای آب‌بند با عمق نسبی  $(Z/d)$  برابر  $0/67$  و بیشتر توانسته‌اند در جلوگیری از وقوع جوشش موفق عمل



شکل ۱۶- تغییرات گرادیان جریان خروجی به ازای عمق نسبی آب زیرزمینی و عمق نسبی دیوار آب بند در شرایط نزول سطح آب کانال

مقدار گرادیان وقوع جوشش در عمق نسبی دیوار آب‌بند برابر یک  $(Z/d=1)$ ، نسبت به نمونه شاهد، در حدود  $1/51$  برابر افزایش یافته است. البته در شرایط نزول سطح آب کانال، مقدار گرادیان وقوع جوشش به‌طور متوسط  $58$  درصد کمتر از مقدار گرادیان در حالت صعود آب زیرزمینی است. کمتر بودن گرادیان وقوع جوشش در حالت نزول سطح آب کانال ناشی از اشباع بودن ترازهای بالایی خاک و در نتیجه تأثیر توامان فشار آب منفذی و فشار ایستایی آب در وقوع پدیده جوشش است (Chen & Huang, 2011).

به‌منظور بررسی اثر دیوار آب‌بند بر مقدار گرادیان وقوع جوشش، در شکل ۱۷ مقادیر متوسط گرادیان جریان خروجی در نمونه‌هایی ارائه شده که پدیده جوشش در آنها، در شرایط صعود آب زیرزمینی و نزول سطح آب کانال، اتفاق افتاده است. مطابق این شکل، با افزایش عمق دیوار آب‌بند در هر دو حالت، مقدار گرادیان وقوع جوشش افزایش یافته است. در حالت صعود آب زیرزمینی مقدار گرادیان وقوع جوشش در عمق نسبی دیوار آب‌بند برابر یک  $(Z/d=1)$ ، نسبت به نمونه شاهد در حدود  $41$  درصد افزایش یافته است. در شرایط نزول آب کانال نیز



شکل ۱۷- تغییرات گرادیان وقوع جوشش در نمونه‌های مورد آزمایش به‌ازای شرایط صعود آب زیرزمینی و نزول سطح آب کانال

### نتیجه‌گیری

در این تحقیق تأثیر دیوار آب‌بند بر کنترل پدیده جوشش در شیب‌های ساحلی در شرایط صعود سطح آب زیرزمینی (شرایط اوج سیلاب) و نزول سطح آب کانال (شرایط فروکش سیلاب) به‌صورت آزمایشگاهی بررسی شده است. نتایج این بررسی‌ها نشان می‌دهد که دیوار آب‌بند تأثیر زیادی بر وقوع نیافتن جوشش یا به تأخیر انداختن آن دارد. در شرایط اوج سیلاب (صعود سطح ایستابی)، زمانی که عمق نسبی آب کانال به حداکثر  $(y/d = 0.7)$  نزدیک می‌شود، به‌علت کم بودن بار هیدرولیکی، وقوع جوشش به حداقل ممکن می‌رسد. وضعیت بحرانی در شرایط اوج سیلاب (صعود سطح ایستابی) زمانی است که با پایدار شدن جریان‌های سیلابی کم تا متوسط (در عمق‌های پایین آب کانال) و تغذیه مداوم آب زیرزمینی، افزایش فشار آب منفذی موجب وقوع جوشش در سطح شیب‌دار ماسه‌ای بشود. در شرایط فروکش سیلاب (نزول سطح آب کانال)، با عمق نسبی آب زیرزمینی حداکثر  $(h/d = 0.933)$ ، در تمامی عمق‌های

نصب دیوار آب‌بند، جوشش در سطح شیب‌دار اتفاق افتاده است. به‌سختی دیگر، بالا بودن عمق آب زیرزمینی باعث از بین رفتن عملکرد دیوار آب‌بند گردیده است. در شرایط فروکش سیلاب، سرعت زهکشی آب زیرزمینی کمتر از سرعت تخلیه آب کانال است، بنابراین در اثر اختلاف فشار ایستابی به وجود آمده، جوشش اتفاق می‌افتد (USBR, 1973). در مقابل، با کاهش عمق آب زیرزمینی، دیوار آب‌بند مانع از وقوع پدیده جوشش می‌شود، به‌طوری که در عمق نسبی آب زیرزمینی  $(h/d)$  برابر  $0.433$ ، دیوارهای آب‌بند با عمق نسبی  $(Z/d)$  برابر  $0.63$  و بیشتر توانسته‌اند در کنترل پدیده جوشش موفق عمل کنند. برابر نتایج این تحقیق می‌توان گفت عملکرد دیوار آب‌بند در کنترل پدیده جوشش در شرایط نزول سطح آب کانال (فروکش سیلاب) کمتر از عملکرد آن در حالت صعود سطح ایستابی (اوج سیلاب) است. همچنین در شرایط نزول سطح آب کانال، عملکرد دیوار آب‌بند در کنترل پدیده جوشش در عمق‌های پایین آب زیرزمینی مناسب است.

### مراجع

- Afifi, S. 2006. Effect of cutoff on the seepage under the earth dams with heterogeneous environment. Proceeding of the 2nd Conference on Applied Geology and the Environment. Iran. (in Persian)

- Anon. 1973. Design of Small Dams. Oxford and IBH Publishing Co. PVT. LTD. India.
- Behrouzinia, S., Ahmadi, H. and Abbasi, N. 2015. Dynamic properties of seepage and stability on upstream slope of an unsaturated homogeneous earth dam subjected to rapid drawdown. J. Agri. Eng. Res. 16(1): 19-36. (in Persian)
- Berilgen, M. M. 2006. Investigation of stability of slopes under drawdown conditions. J. Comput. Geotech. 34(2): 81-91.
- Chen, X. and Huang, J. 2011. Stability analysis of bank slope under conditions of reservoir impounding and rapid drawdown. J. Rock Mech. Geotech. Eng. 3, 429-437.
- Chu-Agor, M., Fox, G. A., Cancienne, R. M. and Wilson, G. V. 2008. Seepage caused tension failures and erosion undercutting of hillslopes. J. Hydrol. 359, 247-259.
- Farsadizadeh, D., Varjavand, P., Hoseinzadeh-Dalir, A., Shokri, N., Hoseini, S. H. and Khosravinia, P. 2014. Effect of cutoff on the side slope stability in earthen channels. Iranian Water Res. 8(14): 195-204. (in Persian)
- Fredlund, D. G. and Rehardjo, H. 1993. Soil Mechanics for Unsaturated Soils. John Wiley & Sons, Inc. New York.
- Gopinathan, M. 1996. An expert System for Riverbank Protection. University of Louisville.
- Katibe, H. 2004. Seepage from lined canal using finite- element method. J. Irrig. Drain. Eng. ASCE. 130(5): 441-444.
- Lopez-Acosta, N. P., Fuente de la, H. A. and Auvinet, G. 2013. Safety of a protection levee under rapid drawdown conditions. Coupled analysis of transient seepage and stability. Proceedings of the 18<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Sep. 2-6. Paris.
- Schnellmann, R. M., Busslinger, H., Schneider, R. and Rahardjo, H. 2010. Effect of rising water table in an unsaturated slope. Eng. Geol. 114(1-2): 71-83.
- Smith, C. D. 1985. Hydraulic Structures. University of Saskatchewan Printing Services. Saskatoon. Canada.

## **Investigation on Effect of Exit Flow Gradient of Piping Phenomenon in Coastal Slopes under Fluctuations of Water Level in Presence of Cutoff Wall**

**Gh. Mahtabi\* and Y. Mehri**

\* Corresponding Author: Assistant Professor, Water Engineering Department, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran. Email: ghmahtabi@gmail.com

Received: 20 February 2016, Accepted: 7 August 2016

One of the main reasons of destruction of the coastal slopes and riverbanks is failure of side slopes under the rising water table or sliding of the side slopes under the drawdown of channel water. In this research, effect of variations of water table and channel water level (peak and drawdown conditions of flood, respectively) on the piping of coastal slopes was studied and effect of cutoff wall on the phenomenon was investigated. Experiments were conducted in a seepage tank having a trapezoidal cross-section with the side slope of 1.5% and 0.58 mm mean diameter of the particles. Cutoff wall was fixed in the relative depths  $Z/d=0.5, 0.67, 0.83$  and 1 ( $Z$  is the depth of cutoff wall and  $d$  is the depth of channel). Results of peak conditions of flood (rising the water table), under controlled experiment showed the relative channel water level was equal to  $y/d=0.7$ . In the experiment with cutoff wall  $Z/d=1$  and without occurrence of piping, exit flow gradient was decreased approximately 41 percent with respect to the control experiment. Piping was occurred only in the relative channel water level equal to  $y/d=0.167$ . Results of drawdown conditions of flood showed, piping phenomenon occurred in the all channel water level. In the experiments with cutoff wall, in the cases with high water table, despite of existence of cutoff wall, increasing the exit flow gradient caused piping phenomenon in the all of the experiments because of increasing hydraulic head. Other wise, in the experiment with the relative water table equal to  $h/d=0.933$ , piping was occurred in the all depths of cutoff.

**Keywords:** Drawdown of Channel Water, Pore Water Pressure, Raising the Water Table