

## Studying the Effect of Geometric Characteristics of Dam on Downstream Saturation in Earth Dam

AHMAD REZA MAZAHERI<sup>1\*</sup>, MEHDI KOMASI<sup>1</sup>, MOHAMMAD SORAGHI<sup>1</sup>, MASOUD NASIRI<sup>2</sup>

1. Department of Civil Engineering, Engineering Faculty, Ayatollah Borujerdi University, Borujerd, Iran.

2. Civil Engineering Department, Engineering Faculty, Razi University, Kermanshah Iran.

(Received: March. 9, 2020- Revised: July. 13, 2020- Accepted: July. 19, 2020)

### ABSTRACT

Various factors affect stability and seepage rate in the embankment dams. These factors are geometrical characteristics of dam embankment and core, permeability coefficient of soil and height of water level in upstream. The above-mentioned factors are discussed using numerical, analytical and experimental methods, and their impacts are evaluated. In the present paper, using the numerical and analytical methods, the saturation condition of downstream crust of non-homogeneous earth dam is investigated. For this purpose, the earth dam embankment was modeled in Geo-Studio software and the effects of different factors including: width, dam core, permeability and water level in the reservoir on saturation rate of dam downstream crust were evaluated. The results of this study indicate that the width and the permeability coefficient ratio of core to crust, have a greatest impact on saturation of dam downstream. In total, 250 models were analyzed in different condition and finally a function was presented in order to investigate the effects of various parameters on saturation of downstream crust of earth dam.

**Keywords:** Earth Dam, Geo-Studio, Saturation, Seepage.

## بررسی تأثیر مشخصات هندسی سد بر اشباع‌شدگی پوسته پایین‌دست در سدهای خاکی

احمدرضا مظاهری<sup>۱\*</sup>، مهدی کماسی<sup>۱</sup>، محمد یونس سراقی<sup>۱</sup>، مسعود نصیری<sup>۲</sup>

۱. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آیت الله العظمی بروجردی (ره)، بروجرد، ایران.

۲. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۱۹ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۴/۲۳ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۴/۲۹)

### چکیده

در سدهای خاکی عوامل مختلفی بر پایداری و میزان دبی عبوری از بدنه سد تأثیرگذار است؛ از جمله این عوامل می‌توان به مشخصات هندسی بدنه و هسته سد، ضریب نفوذپذیری مصالح استفاده‌شده در بدنه سد و ارتفاع آب بالادست سد اشاره کرد. این عوامل با استفاده از روش‌های عددی، تحلیلی و آزمایشگاهی مورد بحث واقع می‌شوند و تأثیر آنها مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در این مقاله قصد بر آن است با استفاده از روش‌های تحلیلی و نرم‌افزاری به بررسی میزان اشباع‌شدگی پوسته پایین‌دست یک سد خاکی غیرهمگن پرداخته شود. برای این منظور بدنه سد خاکی در نرم‌افزار ژئواستودیو مدل‌سازی شده و تأثیر عوامل مختلف از جمله عرض بدنه و هسته سد، ضریب نفوذپذیری و ارتفاع آب پشت سد بر میزان اشباع‌شدگی پوسته پایین‌دست سد مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که عرض هسته و نسبت نفوذپذیری هسته به پوسته تأثیر به‌سزایی بر میزان اشباع‌شدگی پوسته پایین‌دست سد دارد. در مجموع در این پژوهش ۲۵۰ مدل‌سازی مختلف انجام گرفت و در نهایت رابطه‌ای جهت بررسی تأثیر عوامل مختلف بر میزان اشباع‌شدگی پوسته پایین‌دست سد ارائه گردیده است.

واژه‌های کلیدی: سد خاکی، ژئواستودیو، اشباع‌شدگی، نشت.

### مقدمه

امنیت سازه‌ها و حفاظت محیط‌زیست نیازمند شناخت صحیح از رفتار سازه است. یکی از مهمترین سازه‌هایی که نیاز است رفتار آن به‌درستی شناسایی و در تمامی مراحل مورد بررسی دقیق قرار گیرد سدها می‌باشند (Gikas and Sakellariou, 2008). سدهای خاکی و سنگ‌ریز به واسطه مزیت‌های نسبی که نسبت به سایر سدها دارند درصد بیشتری از کل سدهای احداث‌شده را به خود اختصاص داده‌اند (Kalateh and hosseinejad, 2018). عوامل مختلفی بر پایداری و استحکام این سازه‌های مهم تأثیرگذار هستند و کم‌دقتی در هر یک از این عوامل می‌تواند باعث بروز خرابی در آنها شود. بیشترین خرابی‌ها در سدهای خاکی غیر همگن بر اثر تغییرات فشار آب منفذی در هسته در حین ساخت و اولین آبرگیری رخ می‌دهد (Chen et al., 2014). یکی از مهمترین عوامل در طراحی سدها، هسته سدهای خاکی است که ابعاد و مصالح مورداستفاده در ساخت آن تأثیر بسزایی در پایداری کل سد خواهد داشت. در ساخت سدهای خاکی غیرهمگن مصالح مختلفی از قبیل خاک رس، آسفالت و بتن به عنوان هسته می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. محققین مختلف در زمینه

استفاده از این مواد به عنوان هسته سد تحقیقات متعددی را انجام داده‌اند (Jamea and Gorwdon, 1960; Wang and Höeg, 1973; Maskimovic, 2016).

یکی از عوامل مهمی که در طراحی سدهای خاکی مدنظر قرار می‌گیرد میزان دبی نشت از بدنه سد است. روش‌های تحلیلی مختلفی جهت بررسی دبی نشت از بدنه سدهای خاکی طی سال‌های مختلف پیشنهاد گردید. داپیت (۱۸۶۳) با استفاده از قانون داریسی رابطه‌ای جهت محاسبه دبی عبوری از هر سطح قائم پیشنهاد نمود (Dupuit, 1863). Schafferank (1917) رابطه‌ای جهت محاسبه نشت از بدنه سد خاکی همگن روی یک پی نفوذناپذیر ارائه نمود. Casagerande (1937) رابطه‌ای جهت محاسبه میزان جریان عبوری از بدنه یک سازه خاکی ارائه کرد که در آن تأثیر پارامترهای عرض هسته، ارتفاع آب پشت سد و زاویه خاک‌ریزی هسته در نظر گرفته شده بود. Stello (1987) چارتی را جهت پیش‌بینی خط فریاتیکی<sup>۱</sup> در بدنه سدهای خاکی و میزان دبی عبوری از بدنه آنها که روی یک فونداسیون نفوذناپذیر قرار گرفته است، ارائه کرد. سپس نتایج به دست آمده را با تحلیل‌های حاصل از نرم‌افزار مقایسه کرد و مشخص شد که

\* نویسنده مسئول: A.Mazaheri@Abru.ac.ir

در تحقیقاتی که در گذشته صورت گرفته است تأثیر نفوذپذیری هسته و پوسته سد بر ارتفاع خط فریاتیگ و اشباع‌شدگی پوسته پایین‌دست سد بیان شده است و به تأثیر احتمالی سایر عوامل پرداخته نشده است. در این مقاله قصد بر آن است تا به کمک تحلیل‌های عددی و روش‌های تحلیلی به بررسی تأثیر عوامل مختلف مؤثر، از جمله نفوذپذیری مصالح، عرض هسته و ارتفاع سد بر اشباع‌شدگی پوسته پایین‌دست پرداخته شود. با استفاده از ۲۵۰ تحلیل عددی که با تغییر شرایط و پارامترهای مختلف بدنه سد خاکی صورت گرفته است یک رابطه تحلیلی ارائه گردیده است که با استفاده از آن می‌توان میزان اشباع‌شدگی پایین‌دست سد را تعیین کرد.

#### بیان مسئله

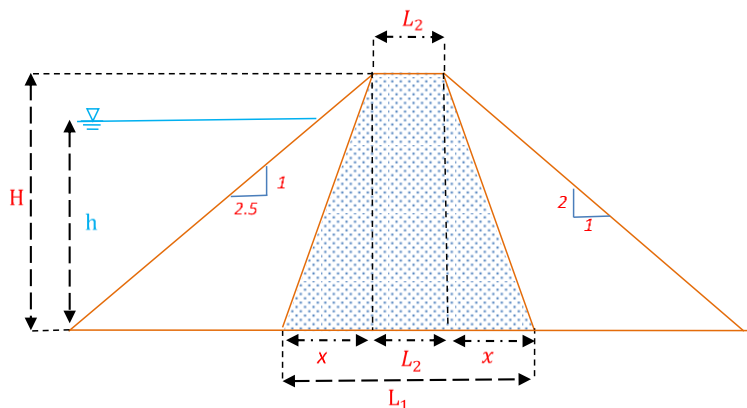
یکی از مهمترین مسئله‌ها در تحلیل سدهای خاکی و بررسی نشت آب در بدنه سدهای خاکی اعم از همگن و غیر همگن، تعیین موقعیت اولین خط جریان یا خط نشت است، زیرا با در دست داشتن این خط می‌توان به آسانی شبکه جریان را ترسیم و مقدار جریان را محاسبه کرد (Rahimi, 2018). در بدنه سدهای خاکی میزان اشباع‌شدگی پوسته در پایین‌دست می‌تواند تأثیر به‌سزایی بر پایداری بدنه داشته باشد. به طوری که اشباع‌شدگی بیش از حد مجاز پوسته پایین‌دست می‌تواند تهدیدی برای پایداری کل سد باشد. این موضوع اگر به درستی بررسی و ارزیابی گردد می‌تواند اطلاعات مناسبی در اختیار طراحان سد و بهره‌برداران قرار دهد (Creager *et al.*, 1965). در این مقاله قصد بر این است تأثیر ارتفاع خط فریاتیگ در پوسته پایین‌دست به دقت بررسی و راه حل تحلیلی جهت تعیین ارتفاع آن ارائه گردد. به این منظور بدنه سد خاکی به صورت شماتیک در شکل (۱) نشان داده شده و با دامنه مشخصی از اطلاعات مورد ارزیابی قرار گرفته است.

حدود ۱۸ درصد اختلاف میان نتایج وجود دارد. او در نهایت رابطه‌ای را جهت محاسبه دبی از سد پیشنهاد کرد (Stello, 1987). از جدیدترین پژوهش‌های انجام شده در زمینه بررسی سطح تراوش می‌توان به پژوهش کاسیموف و همکارانش اشاره کرد که با استفاده از نوارهای مانع و خط رویش گیاه به بررسی خط جریان در بدنه سد پرداختند (Kacimov and Brown, 2015) (Kacimov *et al.*, 2020).

موضوع نشت در سدهای خاکی یکی از مسائل مهم در طراحی است و اگر از مقدار مشخص تجاوز کند، احتمال خرابی در سد خاکی وجود خواهد داشت. با وجود روش‌های مختلف برای بررسی و تحلیل نشت، گاهی در رفتار هیدرولیکی آب و نشت از بدنه و پی سد خاکی تفاوت دیده می‌شود (Stark *et al.*, 2017) (Mohammadi *et al.*, 2015).

Asadi and Khazaei (2016) با استفاده از نرم‌افزار Seep3D به بررسی تحلیل نشت از ساختگاه و بدنه سد خاکی پرداختند. این تحقیق بر روی سد کمال صالح بر اساس نتایج آزمایش‌های لوزان، لوفران و تحلیل‌های نرم‌افزاری صورت گرفت و نتایج نشان داد که مقدار دبی نشت در جناح چپ سد بیشتر از مقدار پیش‌بینی شده در مطالعات است (Asadi and Khazaei, 2016; Emamalizadeh-Ghanati *et al.*, 2016).

Rezk and Senoon (2011) به بررسی و تحلیل نشت از بدنه سدهای خاکی پرداختند. آن‌ها در این تحقیقات با مبنا قراردادن پژوهش Rezk (1995)، به بررسی تأثیر مشخصات هسته و ابعاد آن و نیز نفوذپذیری پوسته و هسته بر میزان افت خط فریاتیگ پس از عبور از هسته پرداختند. آن‌ها بیان کردند که با افزایش نسبت ضریب نفوذپذیری هسته به پوسته، نسبت افت سطح آب پس از عبور از هسته به ارتفاع آب پشت سد، کاهش می‌یابد.



شکل ۱- شماتیک بدنه سد خاکی غیرهمگن

همواره  $0.9H$  در نظر گرفته می‌شود. معیارهای طراحی سد در این تحقیق با استفاده از تجربیات گذشته و با در نظر گرفتن معیارهای

در این شکل  $H$  ارتفاع سد،  $L_1$  عرض هسته سد در بست،  $L_2$  عرض هسته سد در تاج،  $h$  ارتفاع آب پشت سد که در این تحقیق

ارائه شده توسط محققین مختلف در بخش های مقطع عرضی سد، شیب بدنه در بالادست و پایین دست و عرض تاج در نظر گرفته شده است (Rahimi, 2018).

#### مقطع عرضی سد

انتخاب نوع و مقطع سد خاکی تابعی از شکل دره، شرایط زمین شناسی پی و تکیه گاه جانبی، کمیت و کیفیت مصالح موجود و روش ساخت است. طرح انتخاب شده باید بر اساس اطلاعات موجود در زمینه های مذکور و معیارهای کنترل شده و بررسی پایداری دامنه بالادست و پایین دست آن باشد. اجزای سد باید طوری انتخاب شوند که از مصالح موجود در منطقه بیشترین استفاده شود (Creager et al., 1965).

#### شیب بالادست و پایین دست

شیب بالادست و پایین دست سدهای خاکی یکی از عوامل عمده و مؤثر در پایداری سد است. این شیب ها به طور کلی تابع نوع مصالح مورد استفاده، وضعیت پی سد و ارتفاع آن است. شیب بالادست سد خاکی عموماً در حدود ۱:۲ تا ۱:۵ است (۲ و ۵ در جهت افقی و ۱ در جهت قائم). انتخاب این شیب بستگی به نوع مصالح خاکی مورد مصرف دارد. هرچه مصالح خاکی درشت تر باشد می توان شیب بیشتری را انتخاب کرد و هرچه مصالح ریزتر باشد، شیب کمتری مورد نیاز است. محدوده شیب های فوق در صورتی مناسب است که خطر افت ناگهانی سطح آب مطرح نباشد (Rahimi, 2018). شیب پایین دست سدهای خاکی به طور معمول بین ۱:۲ برای مصالح درشت دانه تا ۱:۴ برای مصالح با نفوذپذیری کم تغییر می کند. محققان و سازمان های مختلف علمی یا اجرایی برای انتخاب شیب بدنه سدهای خاکی معیارهای مختلفی را ارائه کرده اند (Rahimi, 2018).

#### ابعاد و شکل هسته

هسته در سدهای خاکی عامل آب بندی و کنترل نشت از بدنه است، از این رو انتخاب نوع مصالح و ابعاد و شکل آن اهمیت زیادی دارد. به طور کلی عواملی مانند مقدار مجاز تلفات آب بر اثر نشت، حداقل ضخامت برای عملی بودن کارهای ساختمانی، نوع و کیفیت مصالح موجود برای هسته و پوسته و سیستم زهکش و فیلتر در تعیین حداقل ضخامت هسته در سدهای خاکی نقش دارند. بر اساس پیشنهاد سازمان عمران آمریکا (USBR) در گذشته معیار لازم برای انتخاب عرض هسته بدین صورت مطرح می شد که در هر ارتفاعی ضخامت هسته کمتر از عمق سد در آن ارتفاع نباشد، به طوری که شیب هیدرولیکی متوسط همواره برابر

یک گردد (USBR, 1987)

با توجه به مقاومت برشی کم مصالح ریزدانه مورد مصرف در هسته سدهای خاکی، در سال های اخیر تلاش زیادی به منظور کاهش ضخامت آن با تکیه بر کیفیت بهتر عملیات طراحی و اجرا صورت گرفته و نتایج بسیار مطلوبی نیز حاصل شده است. به گونه ای که در حال حاضر ضخامت هسته به کار برده شده در سدهای خاکی غیر همگن عمدتاً کمتر از معیار توصیه شده توسط سازمان عمران آمریکا است و در اغلب موارد این ضخامت در حدود 0.5H تا 0.2H متغیر است.

#### عرض تاج سد

انتخاب عرض تاج سد به عوامل مختلفی مانند، ارتفاع سد، اهمیت سد، نوع مصالح بدنه و حداقل فاصله لازم برای جلوگیری از ظاهر شدن خط نشت آب روی شیب پایین دست می تواند تأثیر گذار باشد. به طور متعارف حداقل عرض تاج حتی برای سدهای خاکی بسیار کوتاه نیز کمتر از ۳ متر انتخاب نمی شود. در بیشتر سدهای بزرگ این عرض به طور معمول بین ۶ تا ۱۲ متر متغیر است و عموماً با افزایش ارتفاع سد افزایش می یابد. سازمان عمران آمریکا (USBR) برای سدهای خاکی با ارتفاع های مختلف معیار زیر را پیشنهاد می کند (Rahimi, 2018).

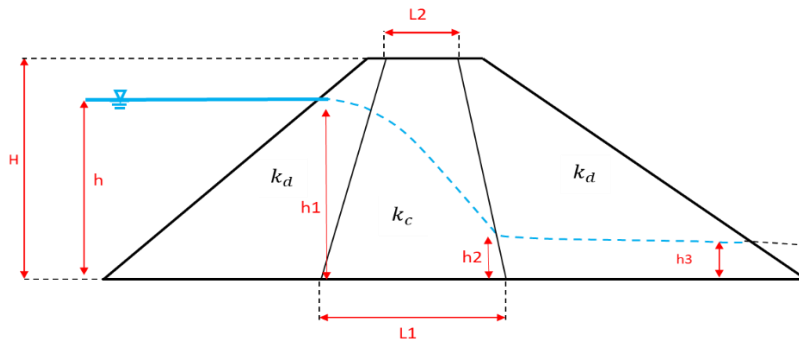
$$L_2 = 0.55\sqrt{H} + 0.2H \quad (\text{رابطه ۱})$$

به منظور بررسی ارتفاع خط فریاتیکی در نقاط مختلف، پارامترهایی روی مقطع عرضی تپ سد در نظر گرفته شده است که در شکل (۲) به آنها اشاره شده است.

در این شکل  $h_1$  ارتفاع خط فریاتیکی در پوسته بالادست،  $h_2$  ارتفاع خط فریاتیکی در هنگام خروج از هسته،  $h_3$  ارتفاع خط فریاتیکی در پاشنه پایین دست پوسته،  $k_d$  ضریب نفوذپذیری پوسته و  $k_c$  ضریب نفوذپذیری هسته است. پارامترهای انتخابی باید به گونه ای باشد که از بازه استاندارد طراحی خارج نگردد. بدین منظور دامنه های ارائه شده در جدول (۱) برای بازه نسبت ها در نظر گرفته شده است.

جدول ۱- بازه تغییرات پارامترهای سد خاکی

مشخصات و نسبت های هندسه سد	دامنه تغییرات
عرض هسته به ارتفاع سد ( $\frac{L_1}{H}$ )	۰/۳ تا ۰/۵
ارتفاع سد (متر)	۳۵ تا ۷۰
نسبت ضریب نفوذپذیری هسته به پوسته ( $\frac{k_c}{k_d}$ )	۰/۱ تا ۰/۵
ضریب نفوذپذیری هسته (متر بر ثانیه)	۸-۱۰ × ۱
شیب پوسته بالادست	۱ به ۲/۵
شیب پوسته پایین دست	۱ به ۲/۲



شکل ۲- شمای کلی از مقطع سد خاکی و ارتفاع خط فریاتیکی

محاسبات، المان‌ها به اندازه‌ای کوچک انتخاب شده‌اند که کوچکتر شدن اندازه المان‌ها تأثیری بر نتیجه و دقت تحلیل‌ها نداشته باشد.

بدین منظور بدنه سد خاکی نشان داده شده در شکل (۱) در نرم‌افزار ژئو استودیو مدل‌سازی شده است. همان‌طور که در جدول (۱) بیان گردید ارتفاع سد در بازه ۳۵ تا ۷۰ متر و نسبت عرض هسته به ارتفاع سد بر اساس مدل‌های مختلف طراحی سد خاکی و تحقیقات صورت گرفته بین ۰/۳ تا ۰/۵ مدل‌سازی شده است (Rezk and Senoon, 2011; Rahimi, 2018; Rezk, 1995). یکی از موارد مهم در مدل‌سازی سدهای خاکی بررسی پایداری بدنه بالادست و پایین‌دست سد خاکی است. در این تحقیق پایداری کلیه مدل‌سازی‌ها در بازه‌ی ارائه‌شده در شکل (۱) بررسی شده است. ضریب اطمینان کلیه شیب‌های بالادست و پایین‌دست در بازه بین ۱/۵ تا ۳ قرار دارد. شکل (۳) نحوه مدل‌سازی در نرم‌افزار ژئو استودیو را نشان می‌دهد.

### نتایج و بحث

#### بررسی میزان دبی عبور از بدنه سد خاکی غیرهمگن

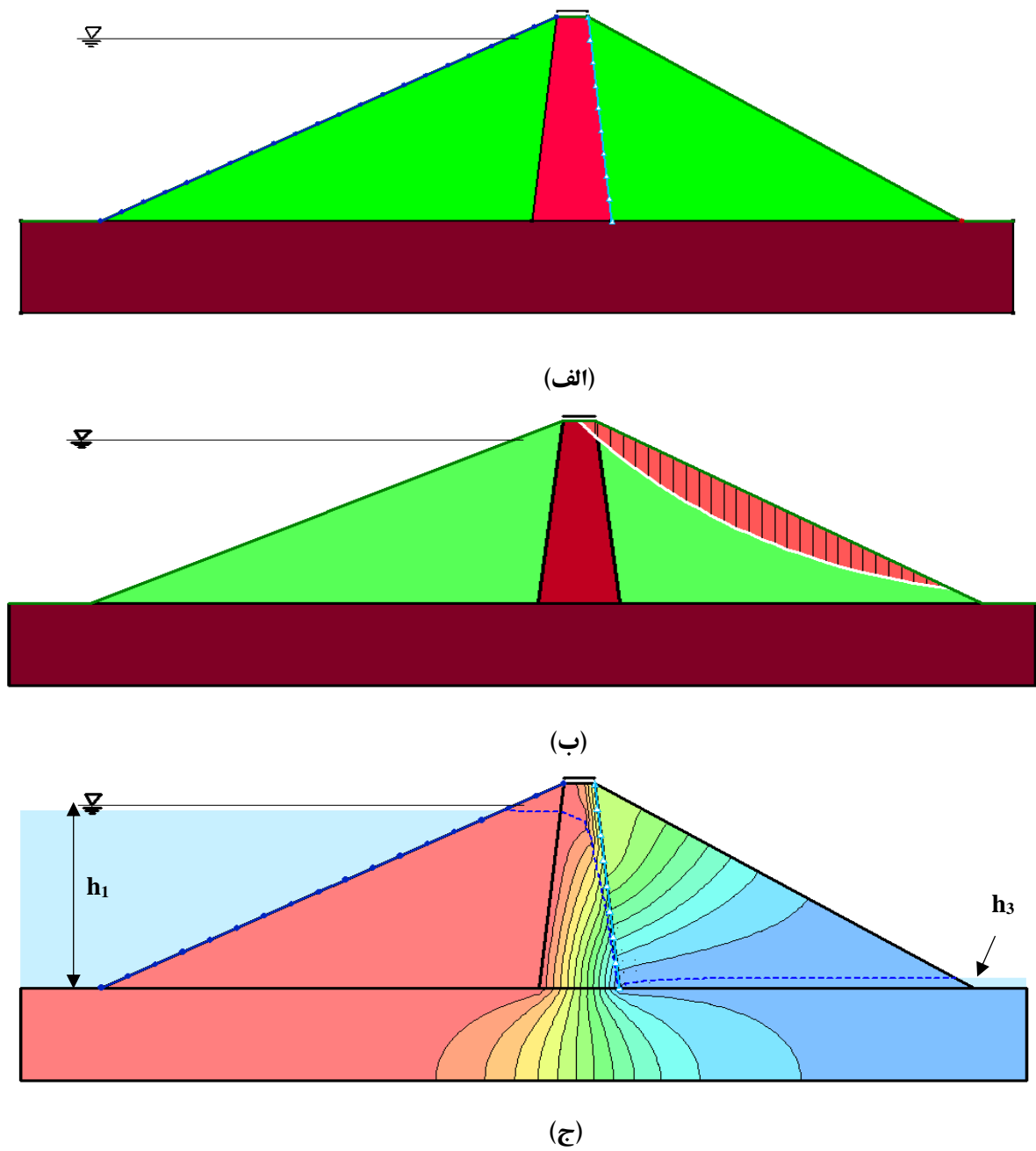
تعیین میزان نشت از بدنه سد خاکی بر اساس روابط تئوریک ارائه‌شده در مکانیک خاک قابل محاسبه است. محققین مختلف نیز روابط تجربی و تحلیلی را جهت محاسبه دبی نشت از بدنه سدهای خاکی غیرهمگن ارائه کرده‌اند. Rezk and Senoon (2011) روابطی جهت محاسبه دبی نشت از بدنه سد خاکی با هسته رسی ارائه داده است. در این تحقیق با مدل‌های انجام‌شده بدنه سد در نرم‌افزار، میزان دبی نشت از بدنه سد خاکی در نسبت نفوذپذیری ۰/۰۱ و ۰/۰۵ هسته سد به پوسته آن برای ارتفاع‌های مختلف سد در نرم‌افزار ژئو استودیو محاسبه شده است و نتایج حاصل با نتایج بدست آمده از روابط روزن و پاولسوفکی مقایسه گردیده است. این نتایج در شکل (۴) و (۵) نشان داده شده است.

#### مدل‌سازی سد در نرم‌افزار ژئو استودیو

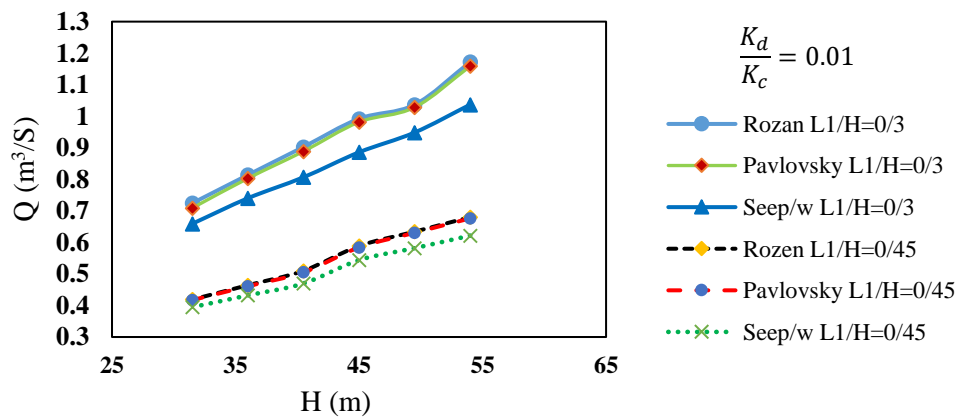
به منظور بررسی رفتار سد خاکی، بررسی پایداری بدنه سد خاکی و اندازه‌گیری میزان دبی عبوری از بدنه و ارتفاع خط فریاتیکی در قسمت‌های مختلف بدنه سد، نیاز است تا مدلی از سد در نرم‌افزار مورد بررسی قرار گیرد. به منظور مدل‌سازی نشت از بدنه سد خاکی از نرم‌افزار Seep/W و پایداری بدنه از نرم‌افزار Slope/W استفاده شده است. نرم‌افزار Seep/W و Slope/W از مجموعه نرم‌افزارهای GeoStudio می‌باشند که در طراحی پروژه‌های آبی و سازه‌های هیدرولیکی استفاده می‌شوند. این نرم‌افزار یک نرم‌افزار عددی است که به تحلیل نشت آب‌های زیرزمینی و مسائل فشار آب منفذی در محیط‌های متخلخل مانند سنگ و خاک می‌پردازد. نرم‌افزار Seep/W می‌تواند هم محیط اشباع و هم غیراشباع را مدل‌سازی و تحلیل نماید. همچنین این نرم‌افزار قادر است به تحلیل پایداری شیروانی‌های سد، تنش-کرنش در بدنه، تحلیل لرزه‌ای در انواع سازه‌های خاکی مسلح و غیرمسلح، ترسیم تراز آب عبوری از درون خاک و بردارهای سرعت و ترسیم خطوط جریان و پتانسیل و محاسبه دبی عبوری برای مقطع مشخصی از خاک بپردازد.

به منظور اطمینان از پایداری بدنه سد از نرم‌افزار Slope/w استفاده شده است. به طوری که ضخامت هسته بین ۰/۳ تا ۰/۵ برابر ارتفاع سد تغییر یافته است و در تمام حالت‌ها ضریب اطمینان در برابر پایداری مورد بررسی قرار گرفته است. هنگامی که ضریب بالادست و پایین‌دست مطابق با آنچه در جدول (۱) ارائه شده در نظر گرفته شود، در تمامی حالات ضریب اطمینان بالادست و پایین‌دست سد تأمین خواهد شد.

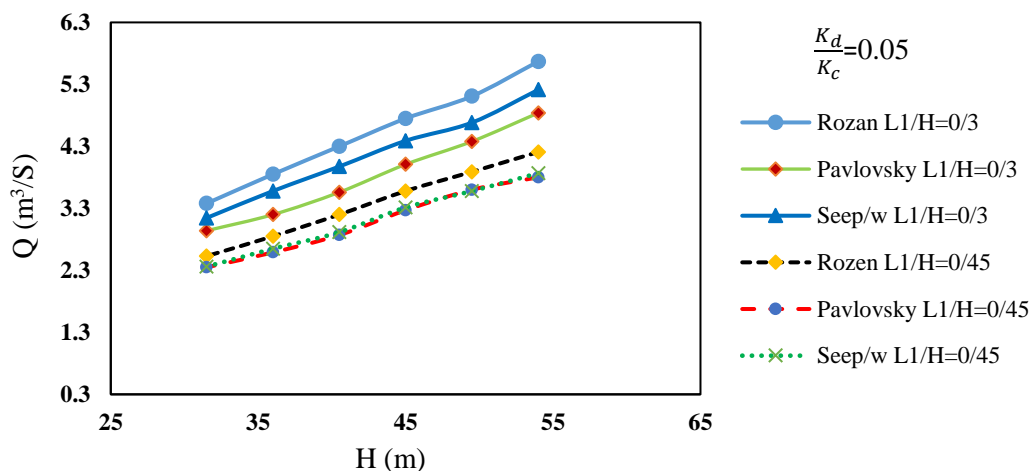
در این تحقیق در مدل‌سازی بدنه سد در Seep/W از ۲۴۰۰۰ المان استفاده شده است و با توجه به اینکه این نرم‌افزار یک نرم‌افزار المان محدود است از المان‌بندی سه‌گره‌ای و چهارگره‌ای استفاده شده است و به منظور افزایش دقت در



شکل ۳- مدل‌های ایجاد شده سد در نرم‌افزار ژئواستودیو بر روی پی نفوذناپذیر (الف) مدل ساخته شده (ب) تعیین ضریب اطمینان شیب در  $Slope/w$  (ج) تعیین خط فریاتیك در  $Seep/w$



شکل ۴- مقایسه میزان دبی نشت از بدنه سد خاکی در نسبت نفوذپذیری هسته به پوسته ۰/۰۱



شکل ۵- مقایسه میزان دبی نشت از بدنه سد خاکی در نسبت نفوذپذیری هسته به پوسته ۰/۰۵

یک چهارم میزان دبی نشت را کاهش دهد. نکته قابل توجهی که از این دو شکل می‌توان دریافت، این است که با افزایش نسبت نفوذپذیری هسته به پوسته افزایش دبی نشت نیز بیشتر خواهد بود. به طوری که مثلاً برای حالت  $L1/H=0.45$  در شرایط نسبت نفوذپذیری هسته به پوسته ۰/۰۱، حداکثر شاهد افزایش  $1/58$  برابری در دبی نشت خواهیم بود. در حالی که اگر نفوذپذیری هسته به پوسته ۰/۰۵ شود، این افزایش  $1/63$  برابر خواهد شد. بر اساس توضیحات ارائه شده می‌توان اظهار داشت که نتایج بیان شده در شکل‌های (۴ و ۵) و نزدیکی میزان دبی نشت به دست آمده از تحلیل نرم‌افزاری و نتایج حاصل از روابط ارائه شده توسط روزن و پاولفسکی، صحت مدل‌های ایجاد شده در نرم‌افزار ژئواستودیو را تصدیق می‌کند.

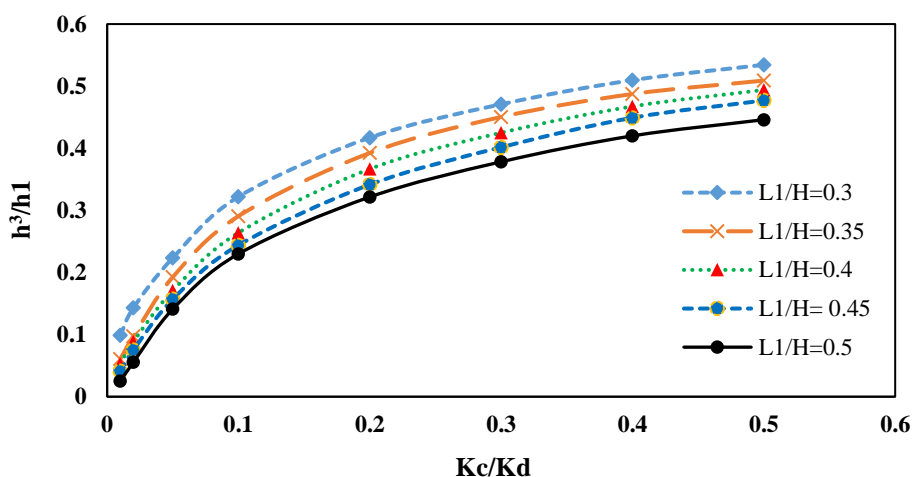
#### بررسی ارتفاع خط فریاتیکی در بدنه سد

همان‌طور که بیان گردید از عواملی که می‌تواند بر پایداری بدنه پایین‌دست سد تأثیرگذار باشد میزان اشباع‌شدگی پوسته است. میزان اشباع‌شدگی پوسته پایین‌دست یا ارتفاع خط فریاتیکی در پوسته به عوامل مختلفی از جمله نفوذپذیری هسته رسی سد، ارتفاع آب پشت سد و عرض هسته بستگی دارد. مهمترین مسئله در بررسی نشت آب در داخل سدهای خاکی، تعیین موقعیت اولین خط جریان یا خط نشت است. زیرا با داشتن این خط و کمی ممارست می‌توان به آسانی شبکه جریان را رسم و مقدار جریان را نیز محاسبه نمود. همچنین با استفاده از شبکه جریان رسم شده، می‌توان محل نقاطی را که از نظر فرسایش در وضعیت بحرانی قرار دارند را تعیین کرد. در این قسمت به بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر ارتفاع خط فریاتیکی پرداخته شده است. همان‌طور که در شکل (۲) مشخص است  $h_1$  ارتفاع تراز آب در بالاست هسته سد در پوسته بالادست و  $h_3$  ارتفاع تراز آب (خط فریاتیکی) در پوسته پایین‌دست سد است. در شکل (۶) نسبت

در شکل (۴)، نتایج صحت‌سنجی نرم‌افزار مورد استفاده در این پژوهش به کمک نرم‌افزار Seep/W و نتایج پاولفسکی و روزن برای نسبت نفوذپذیری هسته به پوسته ۰/۰۱ نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است، نتایج پژوهش‌های روزن و پاولفسکی برای هر دو حالت  $L1/H=0.3$  و  $L1/H=0.45$  برهم منطبق هستند. اما، نتایج مدل‌سازی در این پژوهش مقدار دبی نشت را کمتر محاسبه کرده است، هرچند که رفتار مشابه می‌باشد. همچنین برای حالت  $L1/H=0.45$  میزان اختلاف نمودارها کمتر از حالت قبل است. همین عملکرد مناسب در نشان دادن رفتار دبی نشت بر اساس روابط پیشنهادی، صحت نتایج به دست آمده را نشان می‌دهد.

بر اساس شکل (۵)، صحت سنجی نرم‌افزار مورد استفاده در این پژوهش به کمک نرم‌افزار Seep/W و نتایج پاولفسکی و روزن برای نسبت نفوذپذیری هسته به پوسته ۰/۰۵ انجام شده است. نکته مهم در این حالت آن است که مطابق این شکل در می‌یابیم که بهترین نتیجه برای پاولفسکی و در حالت  $L1/H=0.45$  به دست آمده است. به طوری که همخوانی بسیار مناسب و دقیقی بین نتایج به دست آمده از تحقیقات آن پژوهشگر و مدل‌سازی‌های این مقاله وجود دارد و عملاً دو نمودار بر هم منطبق هستند. در حالی که برای تحقیقات روزن موضوع متفاوت است و میزان دبی در بررسی‌های این محقق بیشتر بوده است (هرچند که رفتار مشابه است). به طوری که می‌توان دریافت که نتایج در شرایط نسبت عرض هسته به ارتفاع سد بیشتر، نزدیکی بیشتری به هم دارند. در شرایط نسبت نفوذپذیری هسته به پوسته ۰/۰۵، حالت  $L1/H=0.3$  دارای دبی در حدود  $1/25$  برابر بیشتر نسبت به حالت  $L1/H=0.45$  خواهد بود. همین موضوع اهمیت نسبت عرض هسته در بستر به ارتفاع سد را مشخص می‌کند و نمایان می‌سازد که افزایش عرض هسته در کف می‌تواند تا حدود

ارتفاع خط فریاتیك در پوسته پایین دست به پوسته بالادست در نسبت نفوذپذیری های مختلف هسته به پوسته گزارش شده است.

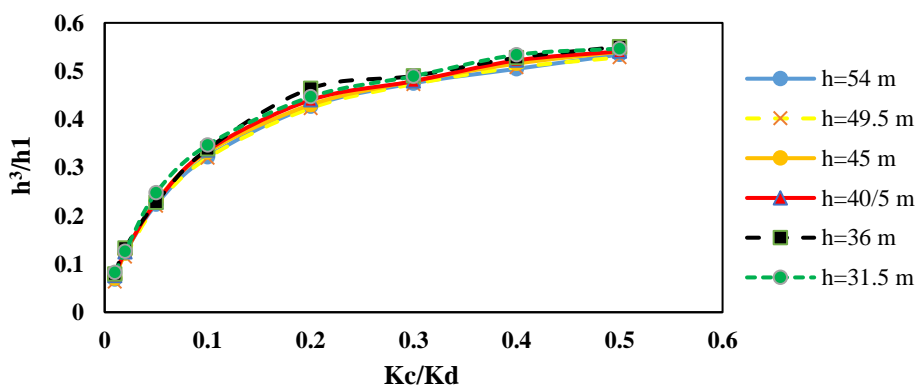


شکل ۶- تأثیر نسبت نفوذپذیری هسته بر تغییر ارتفاع خط فریاتیك در پوسته پایین دست (نتایج مدل ژئواستودیو)

در پوسته پایین دست و افزایش ضریب اطمینان می تواند کاهش ابعاد عرض پوسته پایین دست در طراحی و کاهش حجم عملیات خاکی را در پی داشته باشد. اما موضوع مهم دیگری که بایستی به آن اشاره کرد این است که افزایش ضخامت هسته و کاهش ضخامت پوسته بایستی هم زمان در تعیین ضریب اطمینان پوسته پایین دست مدنظر قرار گیرد. در ادامه برای نسبت عرض هسته به ارتفاع ۰/۳ و برای ارتفاع های مختلف، نسبت تغییرات ارتفاع خط فریاتیك پوسته پایین دست به پوسته بالادست مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتیجه این ارزیابی ها در شکل (۷) نشان داده شده است.

همان طور که در شکل (۶) مشخص است، نسبت نفوذپذیری هسته به پوسته و همچنین نسبت عرض هسته به ارتفاع سد تأثیر به سزایی در کاهش ارتفاع خط فریاتیك در پوسته پایین دست دارد. همان طور که انتظار می رفت کاهش نسبت نفوذپذیری هسته به پوسته، تأثیر بسزایی بر ارتفاع خط فریاتیك در پوسته پایین دست دارد.

اما نکته مهم در این مقاله بررسی تأثیر نسبت عرض هسته به ارتفاع سد است. افزایش این نسبت از ۰/۳ تا ۰/۵ می تواند تا حدود ۳۰ درصد ارتفاع خط فریاتیك در پوسته پایین دست را کاهش دهد. این مهم می تواند باعث افزایش ضریب اطمینان در پوسته پایین دست گردد. علاوه بر آن، کاهش سطح خط فریاتیك



شکل ۷- بررسی تأثیر ارتفاع آب پشت سد بر تغییر ارتفاع خط فریاتیك در پوسته پایین دست (نتایج مدل)

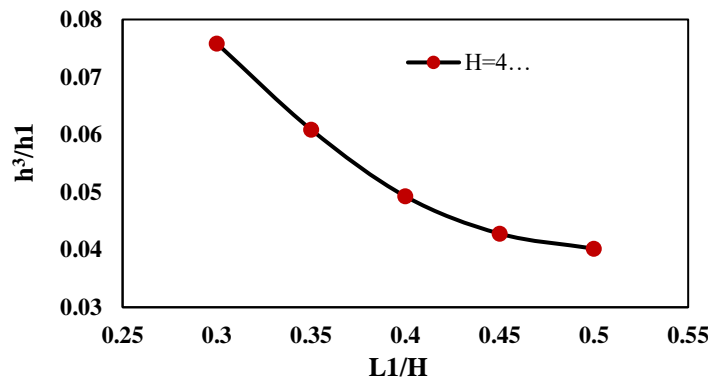
بالادست ندارد، چرا که پراکندگی نتایج به دست آمده بسیار محدود است. بر همین اساس می توان بیان کرد که تأثیر ضریب نفوذپذیری ها و عرض هسته بر تغییر تراز خط فریاتیك بیشتر از تغییرات تراز فریاتیك آب بالادست (در مخزن سد) است و نتایج

همان طور که نتایج مدل سازی اجزای محدود (شکل ۷) نشان داد، افزایش تراز فریاتیك بالادست تأثیر چشمگیری بر نتایج حاصل از نسبت ارتفاع خط فریاتیك در پوسته ی پایین دست به پوسته ی



ارزیابی قرار گرفته است. همان‌طور که مشخص است افزایش عرض هسته می‌تواند کاهش چشمگیری در تراز خط فریاتیکی در پوسته پایین‌دست ایجاد نماید و سبب پایداری بهتر بدنه شود.

قابل توجهی دارد، در حالی که در روابط ارائه شده می‌توان از تأثیر ارتفاع سطح آب بالادست چشم‌پوشی کرد. در شکل (۸) تأثیر نسبت عرض هسته به ارتفاع سد بر تغییر تراز خط فریاتیکی مورد



شکل ۸- بررسی تغییر نسبت عرض هسته به ارتفاع سد بر تغییر ارتفاع خط فریاتیکی در پوسته پایین‌دست در  $Kc/Kd = 0.01$

فراهم کند.

#### مقایسه ارتفاع خط فریاتیکی در پوسته پایین‌دست

Mohamed *et al.* (2011) رابطه‌ای جهت تعیین تراز آب در پوسته پایین‌دست سد خاکی غیر همگن ارائه نمودند. در این رابطه تنها ضریب نفوذپذیری هسته و پوسته بر نسبت تراز آب در پوسته پایین‌دست به پوسته بالادست تأثیرگذار است.

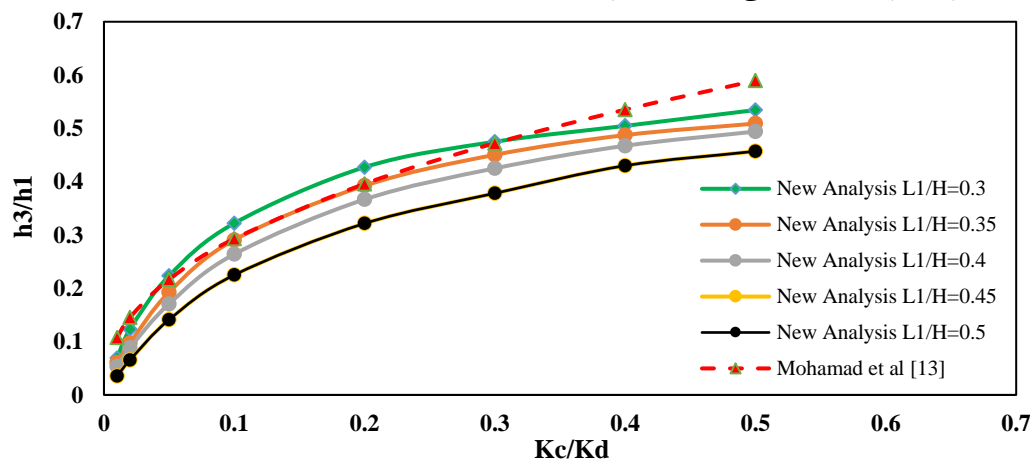
$$\frac{h_3}{h_1} = 0.7969 \left( \frac{K_c}{K_d} \right)^{0.4347} \quad (\text{رابطه ۲})$$

در شکل (۹) نتایج حاصل از تحقیق Mohamed *et al.*

(2011) با نتایج حاصل از تحلیل عددی مقایسه شده است.

در شکل (۸) نشان داده شد که با افزایش عرض کف هسته،

می‌توان میزان نشت آب و به دنبال آن ارتفاع فریاتیکی در پایین‌دست را به صورت قابل توجهی کاهش داد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، افزایش عرض هسته از ۰/۳ ارتفاع تا نصف ارتفاع سد می‌تواند نسبت ارتفاع اشباع‌شدگی پایین‌دست به ارتفاع اولیه آب را تا حدود ۵۰ درصد کاهش دهد. این درصد کاهش نشان‌دهنده‌ی آن است که عرض هسته در صورتی که منبع قرضه‌ی مناسب در دسترس و فراهم باشد و به‌طور دقیق و فنی انتخاب شود، می‌تواند سبب کاهش اشباع‌شدگی پوسته‌ی پایین‌دست شده و همچنین پایداری مناسبی را برای این پوسته



شکل ۹- مقایسه نتایج تحلیل عددی با نتایج ارائه‌شده از رابطه محمدی و همکاران (۲۰۱۱)

آن توجه نشده است و بایستی جهت ارائه نتایج دقیق‌تر در روابط تحلیلی، این پارامتر نیز مد نظر قرار گیرد. به منظور درک بهتر، موضوع برای ارتفاع‌های مختلف آب پشت سد از ۲۰ تا ۶۵ متر و عرض‌های مختلف هسته تحلیل شده و نتایج آن با نتایج رابطه Mohamed *et al.* (2011) مقایسه شده است و ضریب تبیین ( $R^2$ ) آن در جدول (۲) ارائه شده است.

همان‌طور که در این شکل مشخص است نتایج ارائه شده توسط این محقق همخوانی مناسبی با نتایج تحلیل، در شرایطی که عرض هسته روی فونداسیون ۰/۳ ارتفاع سد باشد، داشته اما زمانی که این عرض افزایش می‌یابد نتایج رابطه‌ی (۲) از نتایج تحلیل عددی فاصله می‌گیرد. این بدان معنی است عرض هسته سد نیز پارامتر تأثیرگذاری بوده که در رابطه‌ی (۲) به خوبی به

جدول ۲- ضریب تبیین مقایسه نتایج تحلیل عددی با نتایج حاصل از رابطه

(1995) Mohamed et al.

عرض هسته به ارتفاع سد ( $\frac{L_1}{H}$ )	ضریب تبیین ( $R^2$ )
۰/۳	۰/۹
۰/۳۵	۰/۸۹
۰/۴	۰/۸۴
۰/۴۵	۰/۸۲
۰/۵	۰/۸

شده‌اند. همان‌طور که در رابطه (۳) مشخص است تراز خط فریاتیك علاوه بر آنکه به نفوذپذیری مصالح وابسته است، به عرض هسته سد نیز وابسته است.

در شکل (۱۰) به بررسی و صحت‌سنجی رابطه ارائه شده با نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی پرداخته شده است. در پنج قسمت ارائه شده در شکل (۱۰) ضریب تبیین ( $R^2$ ) تعیین گردیده است. ضرایب تبیین ارائه شده نشان از همخوانی مناسب نتایج رابطه پیشنهادی ارائه شده با نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی دارد.

همان‌طور که در شکل (۱۰-الف تا ه) ملاحظه گردید نتایج رابطه جدید ارائه شده در این مقاله همخوانی مناسبی با نتایج تحلیل‌های عددی دارد. این همخوانی همان‌طور که از ضرایب تبیین مشخص است زمانی که عرض هسته روی فونداسیون ۰/۳ ارتفاع سد باشد از دقت بالاتری برخوردار است و زمانی که عرض هسته روی فونداسیون افزایش می‌یابد مقداری جزئی از دقت نتایج کاسته می‌شود ولی در مجموع دقت نتایج در محدوده‌ای است که برای عرض‌های مختلف هسته قابل استناد است. اما همان‌طور که بیان گردید در روابط گذشته موضوع تغییرات عرض هسته بر اشباع‌شدگی پوسته پایین‌دست نادیده گرفته شده است.

### نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی تأثیر عوامل مختلف بر ارتفاع خط فریاتیك در سدهای خاکی پرداخته شد. در تحقیقات پیشین فقط نفوذپذیری هسته و پوسته در روابط پیشنهادی منظور شده بود. در این پژوهش علاوه بر نفوذپذیری هسته و پوسته، ضخامت هسته نیز در محاسبات وارد شد. نتایج نشان داد که ضخامت هسته نیز یکی از عوامل بسیار اثرگذار در رابطه تراز فریاتیك است که همین موضوع به عنوان نوآوری پژوهش ارائه شده شناخته می‌شود.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

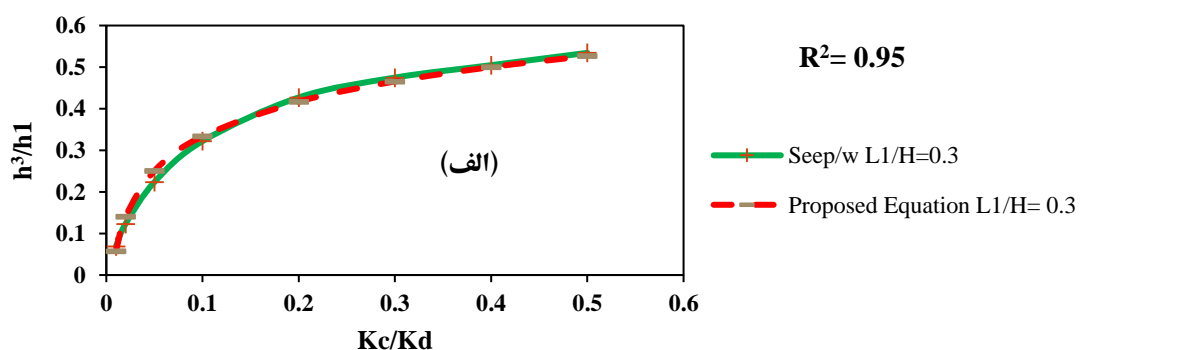
در این جدول همخوانی نتایج تحلیل عددی با نتایج ارائه‌شده توسط Mohamed et al. (2011) آورده شده است. همان‌طور که نشان داده شده، با افزایش نسبت عرض هسته به ارتفاع سد از دقت نتایج کاسته می‌شود. این کاهش دقت به این دلیل است که در رابطه Mohamed et al. (2011) تأثیر عرض هسته سد که پارامتر تأثیرگذاری است، در نظر گرفته نشده است.

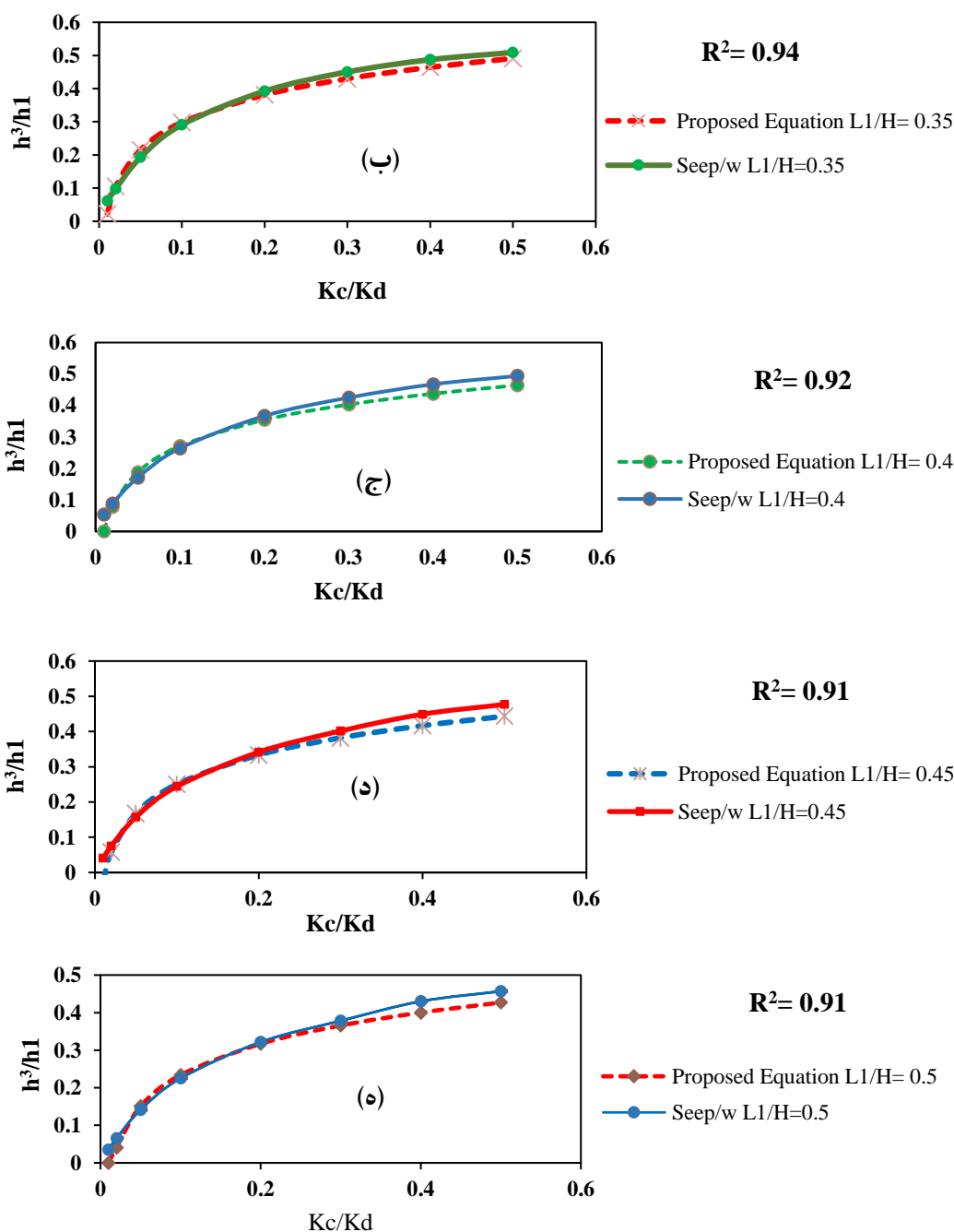
### تعیین ارتفاع خط فریاتیك

همان‌طور که بیان گردید ضخامت هسته سد تأثیر مستقیمی بر تراز خط فریاتیك در پوسته پایین‌دست و میزان اشباع‌شدگی پوسته دارد. در این تحقیق با انجام ۲۵۰ تحلیل مختلف، این موضوع به وضوح رؤیت گردید و نتایج آن در بخش‌های قبل ارائه شد. در این قسمت به منظور تسهیل در درک میزان اشباع‌شدگی پوسته پایین‌دست با استفاده از نرم‌افزار Matlab و رگرسیون گیری غیرخطی، رابطه (۳) جهت پیش‌بینی تراز خط فریاتیك در پوسته پایین‌دست در اثر عوامل مختلف ارائه گردیده است. برای این منظور از ۱۸۰ تحلیل موجود برای واسنجی و ۷۰ تحلیل به منظور صحت‌سنجی رابطه (۳) استفاده شده است که ضریب تبیین ( $R^2$ ) تحلیل‌های صحت‌سنجی ۰/۹۳ به دست آمده است.

$$\frac{h_3}{h_1} = 0.12 \ln \left( \frac{k_c}{k_d} \right) + \sqrt{\frac{H}{9L_1}} \quad (\text{رابطه ۳})$$

در این رابطه همه پارامترها در قسمت‌های پیشین تعریف





شکل ۱۰- مقایسه نتایج تحلیل عددی با نتایج ارائه شده جدید برای دامنه‌های مختلف  $L1/H$  (عرض هسته روی فونداسیون به ارتفاع) برابر  $0/3$  (الف)،  $0/35$  (ب)،  $0/4$  (ج)،  $0/45$  (د) و  $0/5$  (ه)

## REFERENCES

- Asadi, M. and Khazaei, J. (2016). Seepage analysis in body and foundation of Dam using the Seep/3D and Seep/W. Journal of science and today's world 3(10), 457-461
- Casagerande, A. (1937). Seepage through Earth Dams, in Contribution to Soil Mechanics 1925-1940, Boston Society of Civil Engineers, Boston, 295.
- Chen, Q. Hua Zou, Y. Tang, M. Rong He, C. (2014). Modelling the Construction of a HigEmbankment Dam. KSCE Journal of Civil Engineering, 18, 93-102,
- Creager, W. P. Justin, J. D. Hinds, J. (1965). Engineering for Dam. Vol III, John Wiley & Sons. New York.
- Dupuit, J. (1863). Etudes theoriques et pratiques sur le mouvement des eaux dans les canaux decouverts et a travers les terrains permeables. Dunod, Paris.
- Emamalizadeh-Ghanati, A. Asghari-Kaljahi, E. Bashirgonbadi, M. (2016). Optimizing cut off wall depth in Gurdian dam of Julfa based on the seepage analysis by Seep/W. Hydrogeology, 1, 1. (In Farsi)
- Gikas, V. Sakellariou, M. (2008). Settlement Analysis of the Mornos Earth Dam (Greece): Evidence from Numerical Modeling and Geodetic Monitoring. Journal of Engineering Structures, 30,

- 11, 3074-3081.
- Jamea, P. and Gorwdon (1960). Rockfill dams: dams with sloping earth cores, Transaction, ASCE, 125, 3069.
- Kacimov, A. R., & Brown, G. (2015). A transient phreatic surface mound, evidenced by a strip of vegetation on an earth dam. Hydrological Sciences Journal, 60(2), 361-378
- Kacimov, A. R., Yakimov, N. D., & Simunek, J. (2020). Phreatic seepage flow through an earth dam with an impeding strip. Computational Geosciences, 24(1), 17-35
- Kalateh, F. hosseinejad, F. (2018). Coupled Analysis of Earth Dams and Estimating the Associated Pore Water Pressure Using Finite Element Method. Journal of Ferdowsi Civil Engineering, 31, 2. (In Farsi)
- Maksimovic (1973). Position of the central clay core of a rockfill dam in respect to arching and hydraulic fracture, in: Transaction, Eleventh International Congress on Large Dams, vol. III, Madrid.
- Mohamed Abd El-Razek M. Rezk. (1995). Earth dam with an internal core, Alexandria Engineering Journal Alexandria University. 34(1). 1-13.
- Mohamed Abd, El-Razek M Rezk. Ahmed Ali Senoon. (2011). Analytical solution of seepage through earth dam with an internal core. Alexandria Engineering Journal. 50, 111-115
- Mohammadi, M. Barani, G. Qaderi, K. (2015). Optimization of Clay Core Dimensions in Earth Dams Using Simulated Annealing. Amirkabir Journal of Science & Research (Civil & Environmental Engineering), 47, 1. (In Persian).
- Rahimi, H. (2018). Earth Dam. (5th ed) Tehran, Publication University of Tehran.
- Schaffrank, F. (1917). Ber die Standicherheit durchlaessiger geschuetteter Dmme, Allge, Eauzeitung
- Stark, T. D., Jafari, N. H., Zhindon, J. S. L., & Baghdady, A. (2017). Unsaturated and transient seepage analysis of San Luis Dam. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 143(2), 04016093
- Stello, W. (1987). Seepage chart for homogeneous and zoned embankment. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 113(9), 996-1012.
- USBR (1987). Design of Small Dams. U.S. Bureau of reclamation, Department of Interior, Col, USA.
- Wang, W. and Höeg, K. (2016). Simplified material model for analysis of asphalt core in embankment dams. Construction and Building Materials Journal, 124, 199-207.