

مطالعه آزمایشگاهی مساله زهکشی در آبخوان‌های ریزدانه با اثر تغذیه جریان سطحی

صادق نادری^{۱*}، منصور پرویزی^۲، محمد صدقی اصل^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۷/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۱/۲

چکیده

با توجه به ضرورت بحث آب‌های زیر زمینی و همچنین کمبود منابع آب زیر زمینی، در مطالعه حاضر دبی و نیم‌رخ نشت جریان‌های زیر سطحی تحت شرایط با تغذیه سطحی درون محیط متخلخل ماسه‌ای (ماسه ساحلی) با استفاده از یک مدل آزمایشگاهی شبیه‌سازی گردید. سپس داده‌های حاصل از روابط تحلیلی بی‌یر و کاسترو-ارگاز مورد مقایسه قرار گرفت. مدل آزمایشگاهی شامل یک محیط متخلخل ریزدانه به طول ۵ متر، عرض ۰/۶ متر و ارتفاع ۱ متر می‌باشد. برای ترازهای مختلف جریان و شیب ۰/۰۱۳۵ دبی نشت و نیم‌رخ نشت تحت شرایط با تغذیه سطحی اندازه گرفته شده و نتایج حاصل با نتایج حاصل از روابط تحلیلی مورد ارزیابی و قرار گرفت. میزان خطای دبی با استفاده از درصد خطای نسبی و میزان خطای نیم‌رخ نشت با استفاده از مقیاس تابع هدف نرمال (NOF) محاسبه گردید. پس از مقایسه نتایج آزمایشگاهی و نتایج تحلیلی، نقاط ضعف و قوت هر یک از روابط تحلیلی مشخص گردید. پس از محاسبات و ارزیابی نتایج دبی نشت آزمایشگاهی با دبی رابطه تحلیلی بی‌یر در صد خطای نسبی بین ۱۴/۲ تا ۴۴ درصد به دست آمد. با مقایسه نتایج نیم‌رخ نشت آزمایشگاهی با روابط تحلیلی مورد اشاره، میزان NOF برای رابطه تحلیلی بی‌یر بین ۰/۰۳۳ تا ۰/۰۷۴ و برای رابطه تحلیلی کاسترو-ارگاز بین ۰/۰۲۳ تا ۰/۲۴۵ به دست آمد که نشان از انطباق مناسب بین داده‌های برداشت شده آزمایشگاهی با نتایج حاصل از رابطه تحلیلی بی‌یر دارد.

واژه‌های کلیدی: تغذیه سطحی، خط نشت، دبی نشت، روابط تحلیلی، مدل آزمایشگاهی

مقدمه

توپوگرافی سطح، پوشش گیاهی، کاربرد زمین، عمق سطح آب زیرزمینی، شدت و مدت بارندگی، توزیع فصلی بارندگی، دمای هوا و سایر عوامل هواشناسی، و جریان‌های ورودی به و خروجی از حوضه در مقدار تغذیه طبیعی موثر می‌باشد (انصاری ۱۳۹۱).

از نقطه نظر تشابه با جریان آب در کانال‌های روباز، جریان درون محیط‌های متخلخل را این طور تعریف می‌نمایند: این جریان‌ها اصولاً یک بعدی با سطح آزاد و به شکل لوله جریان که ابعاد عرضی آن به مراتب از طول لوله کوچکترند و ممکن است مقطع عرضی این لوله به طور تدریجی با افزایش فاصله در طول جریان اصلی تغییر نماید می‌باشند. بدین ترتیب می‌توان از مؤلفه‌های عرضی جریان صرف نظر نمود. از آنجایی که خطوط جریان مطلقاً موازی هم بوده و سطوح هم پتانسیل نیز مسطح و عمود بر جهت اصلی جریان می‌باشند. بنابراین سطوح هم پتانسیل نیز به نوبه خود با یکدیگر موازی خواهند شد. این راه حل را اولین بار (Dupit 1863) برای مطالعه جریان‌های ماندگار به داخل چاه‌ها و کانال‌ها بکار برد. Dupit فرض کرد که:

۱- در شیب‌های کوچک یک سیستم جریان با سطح آزاد در هر مقطع قائم خطوط جریان را می‌توان افقی فرض کرد. ۲- سرعت جریان متناسب با شیب ایستایی و مستقل از عمق می‌باشد. بر اساس این فرض، (Forchheimer 1886) معادله عمومی

بهره برداری بی‌رویه و غیر متعارف از مخازن آب زیرزمینی منجر به خسارات گوناگونی مانند پایین رفتن سطح آب زیرزمینی، خالی شدن بخش‌هایی از مخزن، منفی شدن بیلان آب دشت‌ها، کاهش آبدهی چاه‌ها، نشست زمین، کاهش کیفیت آب زیرزمینی و غیره خواهد شد. برای حفظ منابع آب زیرزمینی باید میزان برداشت سالیانه از آن‌ها با میزان تغذیه‌ی طبیعی سالیانه به آن‌ها برابر باشد و یا در صورت فراهم بودن شرایط، مخازن آب زیرزمینی را با ایجاد تمهیداتی به طور مصنوعی تغذیه نمود (محمودیان شوشتری ۱۳۸۸).

تغذیه طبیعی پدیده‌ای است که بدون دخالت انسان، آب از منابع سطحی به علت نفوذ عمقی وارد مخازن آب زیرزمینی می‌شود. آب تغذیه‌ی طبیعی غالباً از ریزش‌های جوی، رودخانه‌ها، دریاچه‌های طبیعی، برکه‌ها و جریان‌های زیر سطحی تامین می‌گردد. عوامل متعددی مانند ضخامت و مشخصات خاک، لایه‌بندی خاک،

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد عمران، ژئوتکنیک، دانشگاه یاسوج

۲- استادیار گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یاسوج

۳- دانشیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه یاسوج

*- نویسنده مسئول: (Email: Sadegh_Naderi71@yahoo.com)

(Choi 1984) با بیان این مسئله که کاهش سطح ایستابی آب زیرزمینی در پایداری شیب بسیار اثر گذار است، به استفاده از زهکش-های افقی به صورت لوله‌هایی از جنس PVC که نصب آن‌ها یک راه حل عملی برای کاهش سطح ایستابی آب زیرزمینی می‌باشد پرداخت. وی در تحقیق خود از روش اجزای محدود استفاده کرد و نتایج حاصله را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه و متوجه نزدیکی و انطباق آن‌ها نسبت به هم گردید که می‌تواند روشی ساده و جایگزین محاسبات سخت و پیچیده جهت کاهش سطح ایستابی آب زیرزمینی باشد (Choi 1984).

(Yates and Warrick 1985) یک راه حل تحلیلی برای مسئله غیرخطی (Dupuit & Forchheimer) برای نشت تپه‌های شیبدار در حالت جریان ماندگار در فضای دو بعدی که در فرم یک بعدی به تشریح آن پرداختند، ارائه دادند. این راه‌حل نه تنها پاسخی مناسب برای خود مسئله بود بلکه راه‌حلی برای کنترل پاسخ‌های عددی، حدی و مسائل وابسته به زمان بود. در نتیجه این تحقیق، نیم‌رخ سطح آب تحت شرایط مرزی مختلف و با وجود شیب بستر، به خوبی به دست آمد. راه‌حل‌های ارائه شده، دقیق و به دور از محاسبات سنگین هستند. در این قسمت به طور مختصر به بیان پاسخ خطی حالت ماندگار پرداخته می‌شود (Yates and Warrick 1985):

$$h = h_0 - \frac{R_x}{KI} + \left[\frac{h_1 - h_0 + RL}{Ki} \right] \cdot \left[\frac{\exp\left(-\frac{ix}{\bar{h}}\right) - 1}{\exp\left(-\frac{L}{\bar{h}}\right) - 1} \right] \quad (1)$$

که i : شیب بستر و R : تغذیه سطحی است.

$$\bar{h} = \frac{(h_{min} + h_{max})}{2} \quad (2)$$

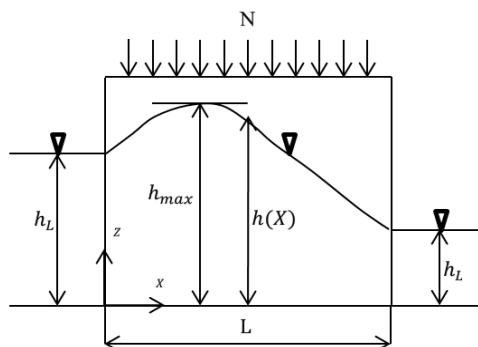
h_{max} : حداکثر ارتفاع به دست آمده از مسئله غیر خطی می‌باشند.

پارامترهای موجود در رابطه (۱)، در شکل زیر به خوبی توصیف شده‌اند.

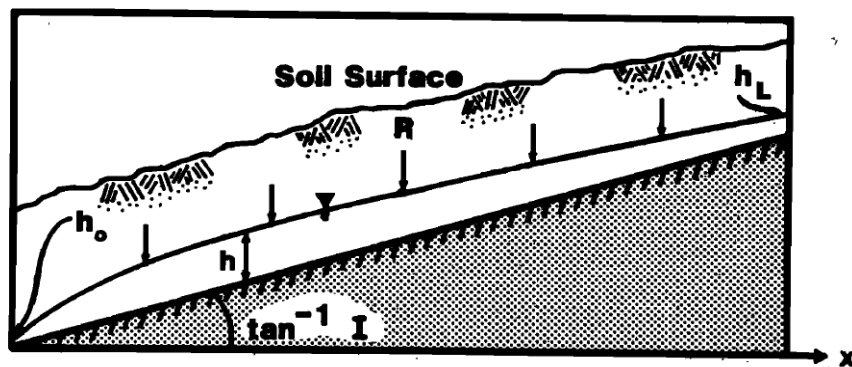
خود را برای سطوح آب آزاد در یک ستون عمودی فرضی از سفره آب زیرزمینی که از بالا به سطح ایستابی و از پایین به طبقه غیر قابل نفوذ محدود بوده و ارتفاع آن h است، پیشنهاد نمود (فرداد، ۱۳۸۴).

(Childs 1971) به بررسی زهکشی آب زیرزمینی مستقر بر سطح شیبدار در دو حالت حضور و عدم حضور تغذیه سطحی به کمک روش‌های تقریبی و انتگرال‌های عددی با الهام گرفتن از تقریب (Dupuit & Forchheimer) در شرایط جریان ماندگار همت گماشته است. وی در تحقیق خود به ارائه روابطی تقریبی برای جریان آب زیرزمینی پرداخته و به کمک رسم نمودارهایی سعی در بیان راه‌حل‌ها داشته است. (Childs 1971) به این نکته پی برد که مقادیر کوچک تغذیه سطحی و شیب‌های بزرگ تأثیر بسزایی در حداکثر ارتفاع سطح ایستابی آب بین دو زهکش مجاور دارد (Childs 1971).

(Bear 1972) در کتاب دینامیک جریان درون محیط‌های متخلخل، به ارائه‌ی روابط تحلیلی Dupuit مربوط به جریان آب‌های زیرزمینی در دو حالت حضور و عدم حضور تغذیه سطحی پرداخت (Bear 1972).



شکل ۱- جریان آزاد در یک سفره‌ی آب زیرزمینی برای حالت با تغذیه



شکل ۲- یک سفره نامحدود بالای یک بستر شیبدار با حضور تغذیه سطحی (Yates and Warrick 1985)

صلاحی‌نیا (۱۳۹۴) در یک تحقیق آزمایشگاهی به وسیله یک فلوم به ابعاد طول، عرض و ارتفاع به ترتیب ۲/۲، ۰/۴ و ۰/۸ متر، برای دبی جریان و نیم‌رخ نشست را برای سه نوع مصالح ریزدانه، درشت‌دانه و مخلوط و سه شیب بستر افق، ملایم و تند در حضور تغذیه سطحی را بررسی نمودند. این مدل در حضور شیب بستر و بارش سطحی قادر به پاسخگویی روابط تحلیلی نبوده که علت آن کوچک بودن ابعاد فلوم گزارش گردید (صلاحی‌نیا ۱۳۹۴).

صدقی‌اصل و انصاری (۲۰۱۶) به ارائه‌ی رابطه‌ای تحلیلی برای جریان ساده‌ی کاملاً توسعه‌یافته‌ی متلاطم (آشفته) طبق نظریه‌ی (Dupuit & Forchheimer) پرداختند. ایشان در تحقیق خویش حالت بی‌بعد رابطه را برای نشان دادن دقت راه‌حل ارائه کردند. نتایج روش آن‌ها با داده‌های آزمایشگاه و رابطه Darcy مقایسه و به این نکته پی بردند که همبستگی بسیار خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد. رابطه پیشنهادی آن‌ها که بر اساس معادله Izbash توسعه یافته بود نتایج بهتری نسبت به روابط تحلیلی Darcy محور ارائه کرد (Sedghi-Asl et al 2016).

در این زمینه تحقیقات دیگری نیز انجام شده است. (Jager 1956)، (Chapman 1980)، (Brutsaert 1994)، (Castro- Orgaz et al. 2012)، (Orgaz et al. 2013)، (Di Nucci 2015).

تاکنون یک تحقیق جامع آزمایشگاهی که شرایط مختلف زهکشی جریان با تغذیه سطحی در آبخوان آبرفتی را بررسی کرده باشد وجود ندارد بنابراین نوآوری این تحقیق تولید داده‌ها و ارزیابی روش‌های تحلیلی و تجربی شرایط زهکشی جریان می‌باشد.

مواد و روش‌ها

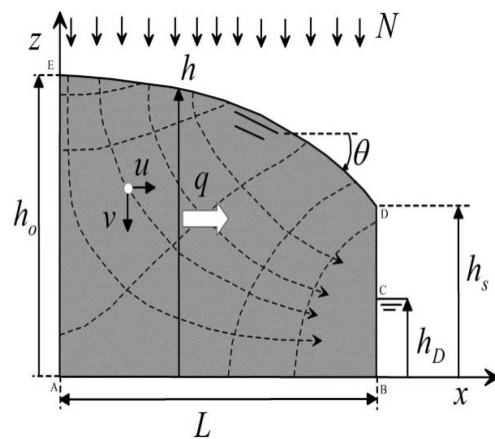
مدل آزمایشگاهی

برای بررسی حرکت آب در لایه‌های مختلف خاک یک مدل آزمایشگاهی به طول موثر ۵ متر، عرض ۰/۶ متر و ارتفاع ۱ متر با استفاده از اسکلت فولادی و جداره‌ی پلکسی‌گلاس در آزمایشگاه ژئوتکنیک دانشگاه یاسوج ساخته و آماده شد. در این مدل آزمایشگاهی ترازهای پیزومتریک با استفاده از ۴۰ عدد پیزومتر شفاف با قطر کم که در کف فلوم به کار رفته اندازه‌گیری شده‌اند. برای کنترل سطح آب بالادست و پایین‌دست فلوم، دو مخزن در ابتدا و انتهای فلوم ساخته شد. ورودی و خروجی این مخزن‌ها طوری طراحی گردید که شرایط ماندگاری دبی جریان رعایت گردد. تراز آب در مخازن بالادست و پایین‌دست توسط یک سری شیر کنترل‌کننده که در ترازهای معینی نصب شده بودند صورت می‌گرفت. عمل تنظیم تراز آب بالادست یا پایین‌دست با بستن شیرهای کنترل‌کننده و باز گذاشتن شیر کنترل‌کننده‌ای که در تراز مورد نظر بود، صورت می‌گرفت. برای جلوگیری از شسته شدن مصالح به مخزن پایین‌دست،

(Chapuis 2010) نشست آب زیرزمینی در حالت ماندگار روی یک سفره نامحدود شیبدار با وجود نفوذ موثر و به کمک پاسخ‌های تحلیلی را مورد ارزیابی قرار داد. وی برای این تحقیق ساحل شمالی رودخانه سینت لارنس را در نظر گرفت که در نتیجه آن یک تقریب خوب برای موقعیت متوسط سطح ایستابی، زمانی که نفوذ موثر متوسط سالیانه در اختیار باشد ارائه داده و سرانجام معادلات خاص (Chapuis 2005) تقریب خوبی از هدایت هیدرولیکی در مقیاس بزرگ و سرعت Darcy در طول سفره شیبدار ارائه می‌دهد (Chapuis 2010).

صدقی‌اصل و همکاران (۱۳۸۹) بیان کردند که در شیب‌های افقی و ملایم، نیم‌رخ جریان درون زهکش‌های سنگریز از تئوری جریان متغیر تدریجی پیروی می‌نماید و نیم‌رخ فرو آب (پایین افتادگی) به خوبی تشکیل می‌شوند. دلیل این امر برقراری تعادل بین نیروهای ثقل و مقاومت جریان می‌باشد. همچنین بحرانی فرض کردن عمق خروجی از انتهای زهکش سنگریز قابل اثبات نبوده و استفاده از آن بیش از ۲۰۰ درصد خطا وارد محاسبات جریان متغیر تدریجی می‌نماید (صدقی‌اصل و همکاران ۱۳۸۹).

(Castro- Orgaz et al. 2012) با ارائه راه حل دوبعدی که بر پایه تکنیک پیکارد به کار می‌رود معادله دیفرانسیل مرتبه‌ی دومی برای حل مسئله تغذیه به‌دست آوردند. ایشان بر پایه این راه حل، مدل تحلیلی اصلاح شده (Dupuit & Forchheimer) را با راه حل دوبعدی مسئله مقایسه کردند (Castro- Orgaz et al. 2012).



شکل ۳- خطوط جریان و خطوط هم‌پتانسیل با تغذیه یکنواخت و ثابت با شدت N (Castro- Orgaz et al. 2012)

صدقی‌اصل و همکاران (۲۰۱۴) با انجام مطالعاتی آزمایشگاهی به ارائه روابطی تحلیلی برای جریان Darcy و Non- Darcy پرداختند. ایشان در این تحقیق موفق به یافتن عمق نرمال جریان درون خاکریز و همچنین رابطه‌ی میان عمق نرمال و طول محیط خاکریز شدند (Sedghi-Asl et al 2014).

برای انجام آزمایش این پژوهش استفاده شده است. ماسه ساحلی مورد استفاده ابتدا با آب شسته شد تا مواد معلق و بسیار ریز از آن جدا شوند. با استفاده از آزمایش بار نفوذپذیری با بار ثابت، ضریب هدایت هیدرولیکی ماسه ساحلی مورد استفاده برابر با 0.34 cm/s تعیین شد.

روش اجرای آزمایش

پس از طی مراحل آب‌بندی دستگاه و اطمینان از عدم آبدهی آن در نقاط مختلف و انجام آزمون‌های اولیه جهت آماده‌سازی دستگاه برای انجام آزمایش‌های اصلی، ابتدا دستگاه روی سطح زمین در دو جهت طولی و عرضی تراز شد تا به علت عدم تراز دستگاه، حرکت آب درون خاک از حالت استاندارد و متعادل خارج نشود.

پس از اطمینان از تعادل دستگاه، مصالح ریزدانه (ماسه ساحلی) به صورت لایه لایه به داخل فلوم ریخته شد. سطح لایه خاک باید بالاتر از تراز شیر کنترل‌کننده قرار می‌گرفت تا آب بتواند درون محیط خاک حرکت داشته باشد.

یک شبکه توری به شماره ۲۰۰ در حد فاصل مخزن تنظیم‌کننده مذکور و پی نصب گردید. برای ایجاد بارش یکنواخت بر روی سطح خاک مورد نظر از لوله‌های آبیاری کم‌فشار که در گلخانه‌ها و آبیاری زمین‌های کشاورزی مورد استفاده قرار می‌گرفت، استفاده شد. این لوله‌ها به دلیل فواصل برابر سوراخ‌ها از یکدیگر و همچنین هم‌اندازه بودن قطر سوراخ‌ها و به علاوه انعطاف پذیر بودن سطوح لوله‌ها جهت تغییر تحت فشار آب ورودی، می‌تواند گزینه مناسبی برای ایجاد بارش یکنواخت بر روی مصالح خاکی باشد. سپس این لوله‌ها باید به یک منبع تأمین آب متصل می‌گردید که برای این منظور مخزن مکعبی شکل با ابعاد $70 \times 50 \times 50$ سانتی‌متر در سطحی بالاتر از محل قرار گیری لوله‌ها مورد استفاده قرار گرفت. این مخزن دارای یک دریچه ورودی در وجه بالایی آن برای وارد کردن آب به داخل آن و یک شیر خروجی برای تنظیم میزان آب ورودی به لوله‌ی تغذیه بود. جهت حفظ تعادل و ثابت ماندن لوله‌ی تغذیه بالای سطح خاک، به یک بست آهنی وصل شد. شکل ۴ تصویر مدل آزمایشگاهی را نشان می‌دهد.

از ماسه ساحلی که از کنار ساحل رودخانه بشار یاسوج تهیه شد،



شکل ۴- فلوم آزمایشگاهی پژوهش حاضر



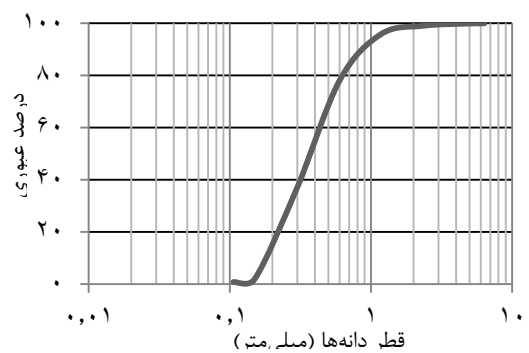
شکل ۵- نمایی از لوله‌های مخصوص بارش سطحی

لوله‌ها، مجدداً روی صفحه مدرج نصب می‌شدند. پس از هواگیری لوله‌ها، پیزومترها قرائت و سپس دبی آب خروجی از درون خاک اندازه گیری می‌گردید. برای افزایش دقت اندازه گیری میزان دبی، سه مرتبه قرائت انجام می‌شد. در طی مراحل آزمایش ماندگاری جریان در طول آزمایش کنترل می‌گردید. پس از قرائت دبی، شیر خروجی منبع متصل به لوله‌های تغذیه باز و فشار آن به نحوی تنظیم می‌گردید که سامانه آبیاری کم‌فشار کاملاً از آب پر شده و قادر به ریزش می‌شدند. پس از ماندگار شدن شدت بارش، مجدداً پیزومترها برای دو شدت بارش متفاوت قرائت و دبی آب خروجی اندازه گیری می‌شد. بعد از حصول اطمینان از صحت نتایج به دست آمده، تراز آب را طی سه مرحله دیگر تغییر داده و مراحل ذکر شده به ترتیب برای هر مرحله تکرار شد.

روابط تحلیلی استفاده شده جهت مقایسه با نتایج آزمایشگاهی

در این بخش از پژوهش به بررسی تحلیلی دبی نشت و نیم‌رخ سطح آب تحت شرایط با تغذیه سطحی درون محیط‌های خاکریز تحت شیب ۰/۰۱۳۵ پرداخته می‌شود. نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام گرفته برای مصالح ریزدانه با نتایج حاصل از روابط تحلیلی (Bear 1972) (روابط شماره ۳ الی ۹) و (Castro- Orgaz et al. 2012) (رابطه شماره ۱۰) ارزیابی و مقایسه می‌شود. با قرار دادن ابعاد و نتایج آزمایشگاهی در روابط تحلیلی ارائه شده، درصد خطای نسبی و همچنین میزان پاسخگویی هر کدام از روابط تحلیلی در قسمت‌های بعد ارائه می‌شود. در جدول ۱ روابط تحلیلی استفاده شده جهت مقایسه با نتایج آزمایشگاهی آورده شده است.

$$q_0 = \frac{K}{2L} (h_0^2 - h_L^2) \quad (3)$$



شکل ۶- منحنی دانه‌بندی ماسه ساحلی پژوهش حاضر

پس از ریختن کامل مصالح به درون فلوم، تراز بالادست و پایین دست در تراز مورد نظر تنظیم شده و سپس مخزن بالادست را تا تراز مورد نظر از آب پر کرده و در نهایت با تنظیم میزان آب جهت تأمین آب مخزن بالادست، دستگاه جهت انجام آزمایش آماده می‌شد. برای مصالح ریزدانه مدت زمانی حدود ۴۸ ساعت طول می‌کشید تا آب از مخزن بالادست درون خاک جریان یافته و به مخزن پایین دست راه یافته و در تراز تنظیم شده از فلوم خارج گردد. طی این مدت زمان، تراز آب بالادست باید مرتباً کنترل و از تراز آب در مخزن بالادست اطمینان حاصل می‌شد. فشار آب در روند آزمایش تأثیر گذار بود بنابراین فشار آب باید آنقدر کم و زیاد می‌شد تا بتواند در یک تراز معین ثابت باقی بماند. پس از خروج آب از مخزن پایین دست، پیزومترها باید هواگیری می‌شدند تا حباب‌های هوا به طور کامل از درون آنها خارج می‌شد. جهت این امر، لوله‌ها را از روی تخته مدرج پایین آورده و روی زمین نهاده و اجازه داده می‌شد تا حباب‌های هوای موجود در آنها خارج گردد. پس از اطمینان از هواگیری کامل

شروع جریان، q_L : دبی در واحد عرض در نقطه انتهایی جریان، q_x : دبی در واحد عرض در هر نقطه دلخواه، x_{WD} : محل حداکثر ارتفاع سطح آب زیرزمینی، h_{max} : حداکثر ارتفاع سطح آب زیرزمینی، Q : نرخ جریان ورودی (دبی)، L : طول بستر و b : عرض بستر است.

$$h^2 = \left[h_D^2 + \frac{N}{K}(L^2 - x^2) + \frac{2}{3} \left(\frac{N}{K} \right)^2 x^2 \right] \left(1 - \frac{2N}{3K} \right)^{-1}, N/K < 3/2 \quad (10)$$

که h_0 : عمق بالادست، h_D : عمق پایین دست، K : ضریب هدایت هیدرولیکی، N : میزان شدت بارش و L : طول بستر است.

$$q_L = \frac{K(h_0^2 - h_L^2)}{2L} + \frac{NL}{2} \quad (4)$$

$$q_x = \frac{K(h_0^2 - h_L^2)}{2L} + \frac{N}{2}(2x - L) \quad (5)$$

$$Q = q \times b \quad (6)$$

$$h = \left[h_0^2 - \frac{h_0^2 - h_L^2}{L}x + \frac{N}{K}(L - x)x \right]^{1/2} \quad (7)$$

$$x_{WD} = \frac{L}{2} - \frac{N}{K} \frac{h_0^2 - h_L^2}{2L} \quad (8)$$

$$h_{max}^2 = h_0^2 - \frac{h_0^2 - h_L^2}{L}x_{WD} + \frac{N}{K}(L - x_{WD})x_{WD} \quad (9)$$

که h_0 : عمق بالادست، h_L : عمق پایین دست، K : ضریب هدایت هیدرولیکی، N : میزان شدت بارش، q_0 : دبی در واحد عرض در نقطه

جدول ۱- روابط تحلیلی استفاده شده جهت مقایسه با نتایج آزمایشگاهی

شماره رابطه (روابط) تحلیلی	مرجع	پارامترهای مورد ارزیابی
۳-۶	بی.یر (۱۹۷۲)	دبی نشت
۷-۹	بی.یر (۱۹۷۲)	نیمرخ نشت
۱۰	کاسترو- ارگاز و همکاران (۲۰۱۳)	نیمرخ نشت

تحلیلی از نمودار گرافیکی خطای نسبی تخمین عمق استفاده می شود که در آن، محور افقی آن $\frac{x}{L}$ و محور عمودی آن خطای نسبی (RE) طبق با رابطه زیر است:

$$RE = \frac{H_E - H_A}{H_E} \quad (15)$$

که H_E : ارتفاع هر نقطه در مدل آزمایشگاهی و H_A : ارتفاع هر نقطه در رابطه تحلیلی است.

نتایج و بحث

مقایسه نتایج آزمایشگاهی با رابطه تحلیلی بی.یر (۱۹۷۲)

در این بخش از پژوهش، داده های آزمایشگاهی با داده های حاصل از رابطه تحلیلی بی.یر (۱۹۷۲) روابط (۳) الی (۹) مقایسه می شوند. دبی و نیمرخ به دست آمده از رابطه تحلیلی بر اساس ضریب هدایت هیدرولیکی، میزان شدت بارش، عمق آب در مخزن بالادست، عمق آب در مخزن پایین دست و طول فلوم می باشد. شکل ۷ مقایسه داده های آزمایشگاهی با داده های تحلیلی بی.یر (۱۹۷۲) را تحت شرایط تغذیه سطحی نمایش می دهند. با مقایسه ی نیمرخ سطح آب مدل آزمایشگاهی با رابطه ی تحلیلی بی.یر (۱۹۷۲) می توان دریافت که الگوی مشخصی در هفت مدل تکرار شده است که بیان کننده این واقعیت است که مدل آزمایشگاهی و رابطه تحلیلی بی.یر (۱۹۷۲) تقریباً با هم تطابق دارند. با توجه به شکل ۷ می توان دریافت که با افزایش شدت تغذیه رابطه تحلیلی بی.یر (۱۹۷۲) عمق را بیشتر برآورد می کند که این نکته بیان کننده این موضوع است که رابطه تحلیلی بی.یر (۱۹۷۲) نسبت به شدت تغذیه حساس می باشد.

معرفی پارامترهایی جهت ارزیابی نتایج مدل آزمایشگاهی و روابط تحلیلی

با توجه به این که یکی از اهداف روابط تحلیلی به دست آوردن جریان عبوری (دبی نشت) از بدنه خاکریز می باشد به همین دلیل برای کمی سازی تفاوت بین نتایج داده های مدل آزمایشگاهی با رابطه (RE) (Relative Error) تحلیلی از معیار آماری درصد خطای نسبی به صورت زیر استفاده می شود:

$$RE = \frac{|Q_E - Q_A|}{Q_E} \times 100 \quad (11)$$

که در این رابطه Q_E : مقدار دبی آزمایشگاهی و Q_A : مقدار دبی تحلیلی است.

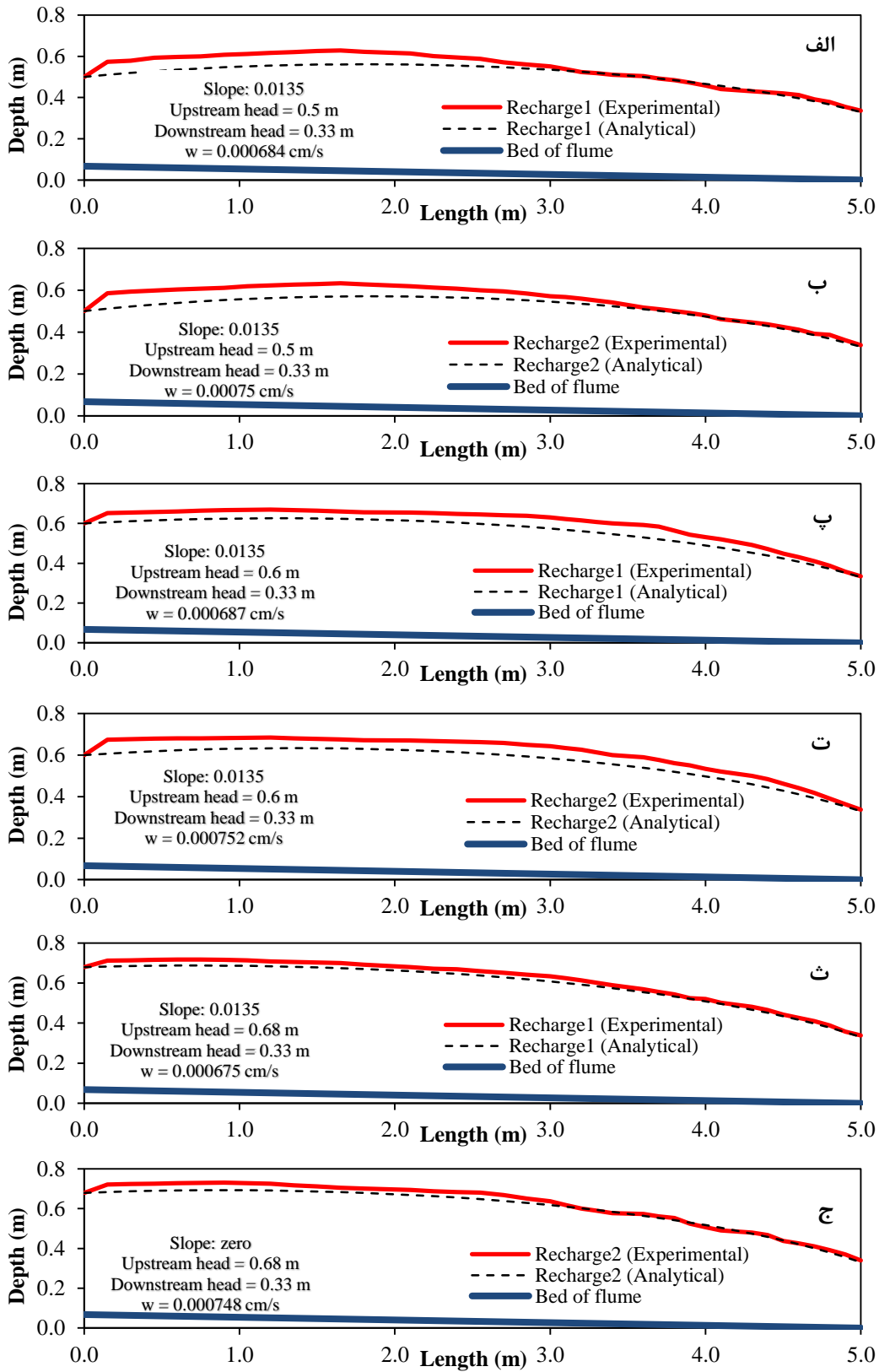
هر چه مقدار RE بیشتر باشد بیانگر تفاوت بالای نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی می باشد و هر چه کمتر باشد و به صفر نزدیکتر باشد بیانگر همبستگی بالای نتایج آزمایشگاهی تحلیلی است. بهترین رابطه برای به دست آوردن میزان خطای بین داده های آزمایشگاهی و تحلیلی استفاده از مقیاس تابع هدف نرمال (NOF) است.

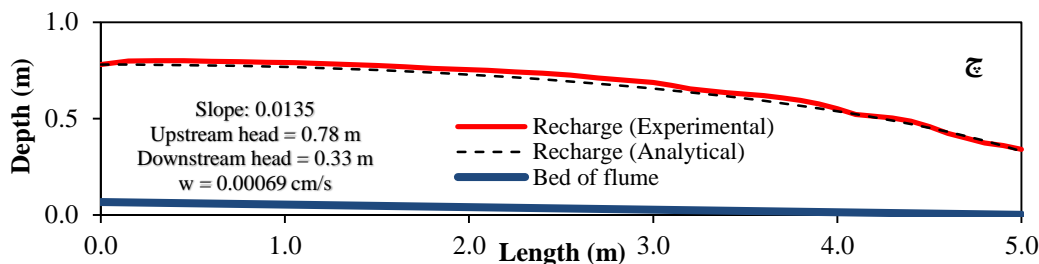
$$NOF = \frac{RMSE}{X} \quad (12)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2}{N}} \quad (13)$$

$$X = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (14)$$

که N : تعداد داده های آزمایشگاهی (تمام مشاهدات)، X : میانگین داده های آزمایشگاهی، x_i : مقدار هر مرحله از داده های آزمایشگاهی و y_i : مقدار هر مرحله از داده های تحلیلی است. برای توزیع پراکندگی خطای نسبی بین نیمرخ آزمایشگاهی و





شکل ۷- نیمرخ سطح آب مدل آزمایشگاهی و تحلیلی بی‌یر (۱۹۷۲)

الف) دبی ۲۳/۲ میلی‌لیتر بر ثانیه - ب) دبی ۲۵/۳۷ میلی‌لیتر بر ثانیه - پ) دبی ۲۵/۴۸ میلی‌لیتر بر ثانیه - ت) دبی ۲۷/۴۵ میلی‌لیتر بر ثانیه - ث) دبی ۲۷/۱۷ میلی‌لیتر بر ثانیه - ج) دبی ۲۹/۳۶ میلی‌لیتر بر ثانیه - چ) دبی ۳۱/۵۸ میلی‌لیتر بر ثانیه

(۱۹۷۲)، در حد فاصل ۰ تا ۱۸۰ سانتی‌متری تراز آب بالادست واقع گردیده است که باز هم این نتایج تطابق نسبتاً خوبی بین نتایج تحلیلی بی‌یر (۱۹۷۲) و آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. با مشاهده جدول ۲ که میزان خطای NOF و درصد خطای نسبی دبی رابطه‌ی تحلیلی بی‌یر (۱۹۷۲) با مدل آزمایشگاهی نشان می‌دهد، می‌توان به این نکته پی برد که میزان خطای NOF رابطه تحلیلی بی‌یر (۱۹۷۲) بین ۰/۰۳۳ الی ۰/۰۷۶ می‌باشد.

با اندکی دقت در شکل ۷ می‌توان به این نکته اشاره کرد که در ترازهایی که شدت بارش کمتر است نتایج آزمایشگاهی به نتایج تحلیلی بی‌یر (۱۹۷۲) نزدیکتر می‌باشد. با توجه به شکل ۷ می‌توان دریافت، در نیمرخ به دست آمده از آزمایش، نقطه اوج منحنی در نزدیکی تراز آب بالادست و در حد فاصل ۴۵ تا ۱۶۵ سانتی‌متری آن واقع شده است (که هر چه سطح آب درون مخزن بالادست بیشتر می‌شد فاصله‌ی نقطه اوج منحنی تا سطح آب مخزن بالادست کمتر می‌شد) با این تفاوت که نقطه اوج منحنی رابطه تحلیلی بی‌یر

جدول ۲- میزان خطای NOF و درصد خطای نسبی دبی رابطه‌ی تحلیلی بی‌یر (۱۹۷۲) با مدل آزمایشگاهی

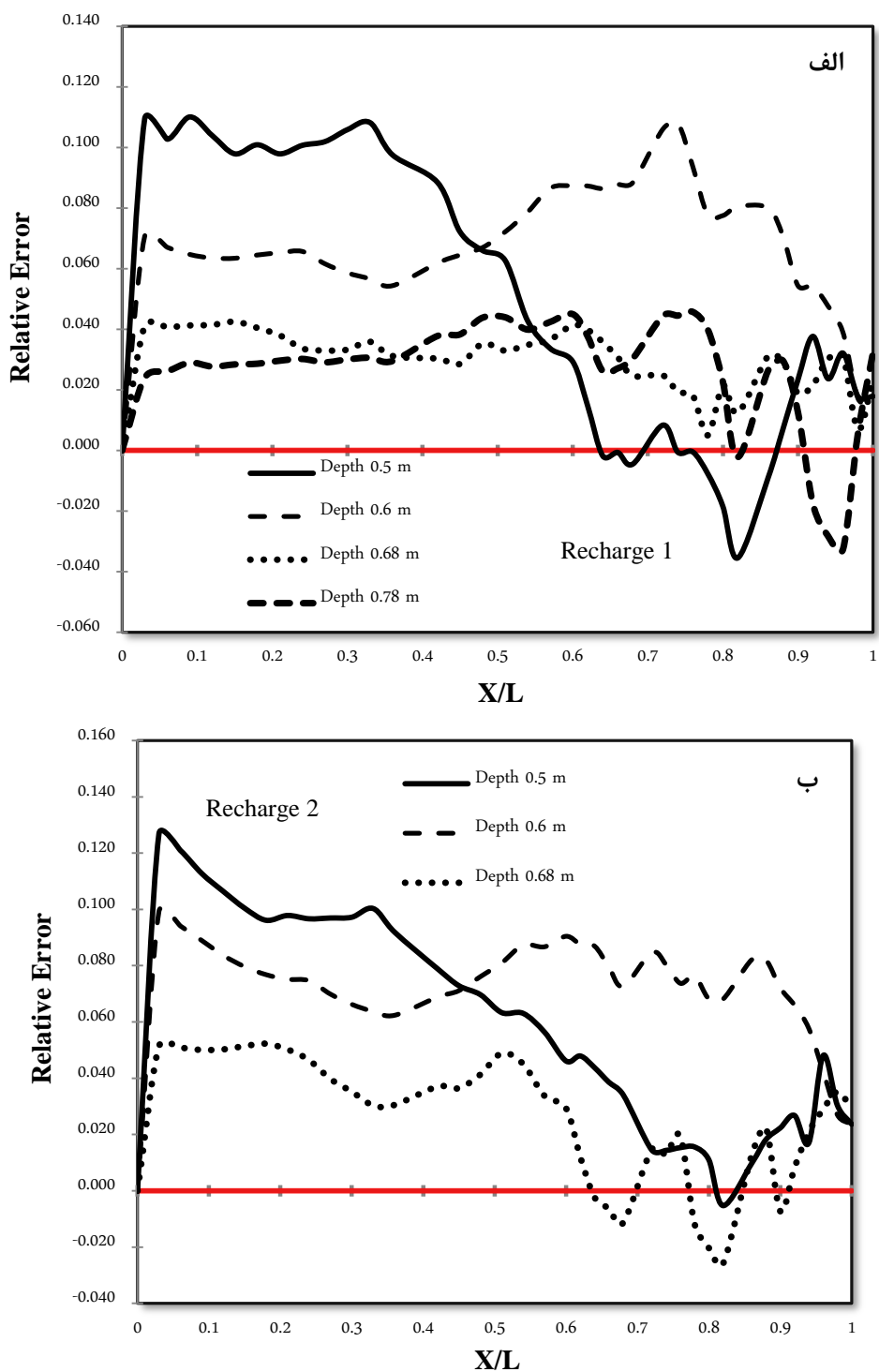
تراز آب بالادست (m)	تراز آب پایین دست (m)	شدت تغذیه سطحی (cm/sec)	میزان خطای NOF	دبی بعد از تغذیه سطحی در مدل آزمایشگاهی (ml/sec)	دبی بعد از تغذیه سطحی در روش تحلیلی (ml/sec)	درصد خطای نسبی (RE)
۰/۵	۰/۳۳	۰/۰۰۰۶۸۴	۰/۰۷۴	۲۳/۲	۱۳/۱۴	۴۳/۳۶
۰/۵	۰/۳۳	۰/۰۰۰۷۵	۰/۰۷۶	۲۵/۳۷	۱۴/۱۳	۴۴/۳
۰/۶	۰/۳۳	۰/۰۰۰۶۸۷	۰/۰۷۳	۲۵/۴۸	۱۵/۴۳	۳۹/۴۴
۰/۶	۰/۳۳	۰/۰۰۰۷۵۲	۰/۰۷۶	۲۷/۴۵	۱۶/۴	۴۰/۲۵
۰/۶۸	۰/۳۳	۰/۰۰۰۶۷۵	۰/۰۳۴	۲۷/۱۷	۱۷/۳۳	۳۶/۲۱
۰/۶۸	۰/۳۳	۰/۰۰۰۷۴۸	۰/۰۳۷	۲۹/۳۶	۱۸/۴۳	۳۷/۲۲
۰/۷۸	۰/۳۳	۰/۰۰۰۶۹	۰/۰۳۳	۳۱/۵۸	۲۰/۵۴	۱۴/۲۱

آزمایشگاهی و رابطه‌ی تحلیلی بی‌یر (۱۹۷۲) را نشان می‌دهد. در جدول ۲ دبی به دست آمده از رابطه تحلیلی بر اساس ضریب هدایت هیدرولیکی، طول فلوم، میزان سطح آب در مخزن بالادست و پایین دست و شدت بارش می‌باشد. این جدول میزان خطایی بین ۱۴/۲ تا ۴۴/۳ برای حالت با تغذیه را نشان می‌دهد، که درصد خطای نسبی گویای این نکته است که اختلاف‌هایی بین نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی وجود دارد. هرچه این میزان خطاها کمتر باشد، بیان کننده این واقعیت است که مدل آزمایشگاهی و رابطه‌ی تحلیلی بی‌یر (۱۹۷۲) نزدیکی بیشتری داشته و مدل آزمایشگاهی توانسته دبی آب عبوری را مدل سازی کند.

با توجه به جدول ۲ می‌توان مشاهده کرد که با افزایش عمق آب بالادست و به تبع آن افزایش گرادیان هیدرولیکی میزان درصد خطای نسبی به نحو چشمگیری کاهش یافته است. به عبارت دیگر رابطه تحلیلی بی‌یر (۱۹۷۲) در ترازها و گرادیان‌های بالاتر عملکرد و دقت خوبی از خودش نشان داده است.

با اندکی دقت در جدول ۲ می‌توان دریافت که در همه ترازها مقدار دبی رابطه تحلیلی بی‌یر (۱۹۷۲) کمتر از مقدار دبی نتایج آزمایشگاهی می‌باشد که این نکته نشان می‌دهد رابطه تحلیلی بی‌یر (۱۹۷۲) کمی محتاط می‌باشد، همچنین درصد خطای نسبی دبی با افزایش عمق آب در تراز بالادست کاهش می‌یابد.

جدول ۲ درصد خطای نسبی دبی بعد از تغذیه سطحی در مدل



شکل ۸- ترسیم گرافیکی خطای نسبی تخمین عمق نتایج آزمایشگاهی و رابطه تحلیلی بی‌یر (۱۹۷۲) مصالح ریزدانه در شرایط با تغذیه سطحی (الف) شدت تغذیه ۱ (ب) شدت تغذیه ۲

قسمت مثبت محور قرار بگیرد یعنی عمق آزمایشگاهی بیشتر از عمق تحلیلی برآورد شده است ولی اگر در قسمت منفی محور قرار بگیرد

با توجه به شکل ۶ که محور افقی آن فاصله هر پیزومتر بر طول فلوم و در محور عمودی میزان خطای نسبی را نشان می‌دهد (اگر در

آن می‌باشد که از نقاط ضعف رابطه تحلیلی محسوب می‌شود و دلیل آن را می‌توان در این حقیقت دانست که در رابطه تحلیلی کاسترو-ارگاز و همکاران (۲۰۱۲) فقط اثر عمق آب در مخزن پایین دست لحاظ گردیده و از اثر عمق آب در مخزن بالادست صرف نظر شده است، که با توجه به این که در مدل آزمایشگاهی عمق آب در مخزن پایین دست در همه ترازها ثابت و میزان شدت بارش در ترازهای مختلف تفاوت چندانی نداشته است پس شکل نیمرخ در همه ترازها تقریباً یکسان به دست آمده است.

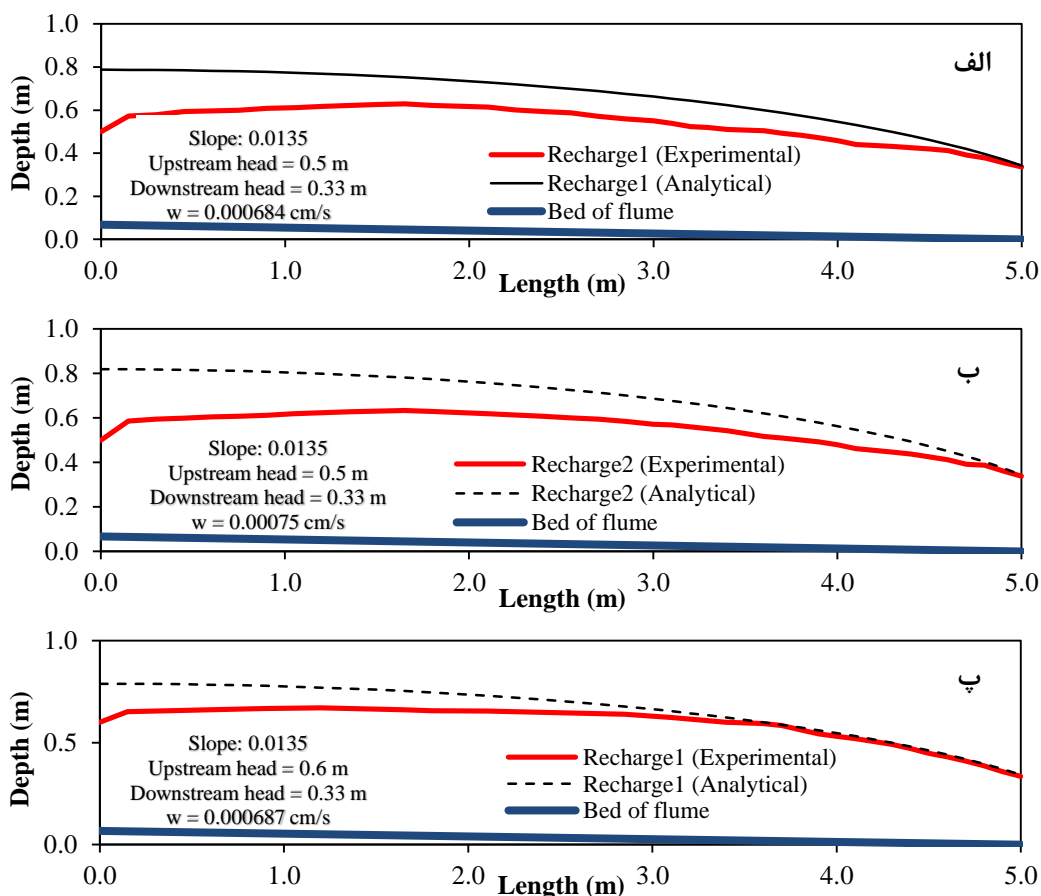
با مشاهده شکل ۹، در نیمرخ به دست آمده از آزمایش، نقطه اوج منحنی در حد فاصل ۴۵ تا ۱۶۵ سانتی متری از تراز آب بالادست واقع شده است با این تفاوت که در رابطه تحلیلی کاسترو-ارگاز و همکاران (۲۰۱۲) نقطه اوج برای منحنی وجود ندارد. مقایسه شکل های ۷ و ۹ نشان می‌دهد که مدل آزمایشگاهی تطابق بیشتری با رابطه‌ی تحلیلی بی‌یر (۱۹۷۲) در مقایسه با رابطه تحلیلی کاسترو-ارگاز و همکاران (۲۰۱۲) دارد.

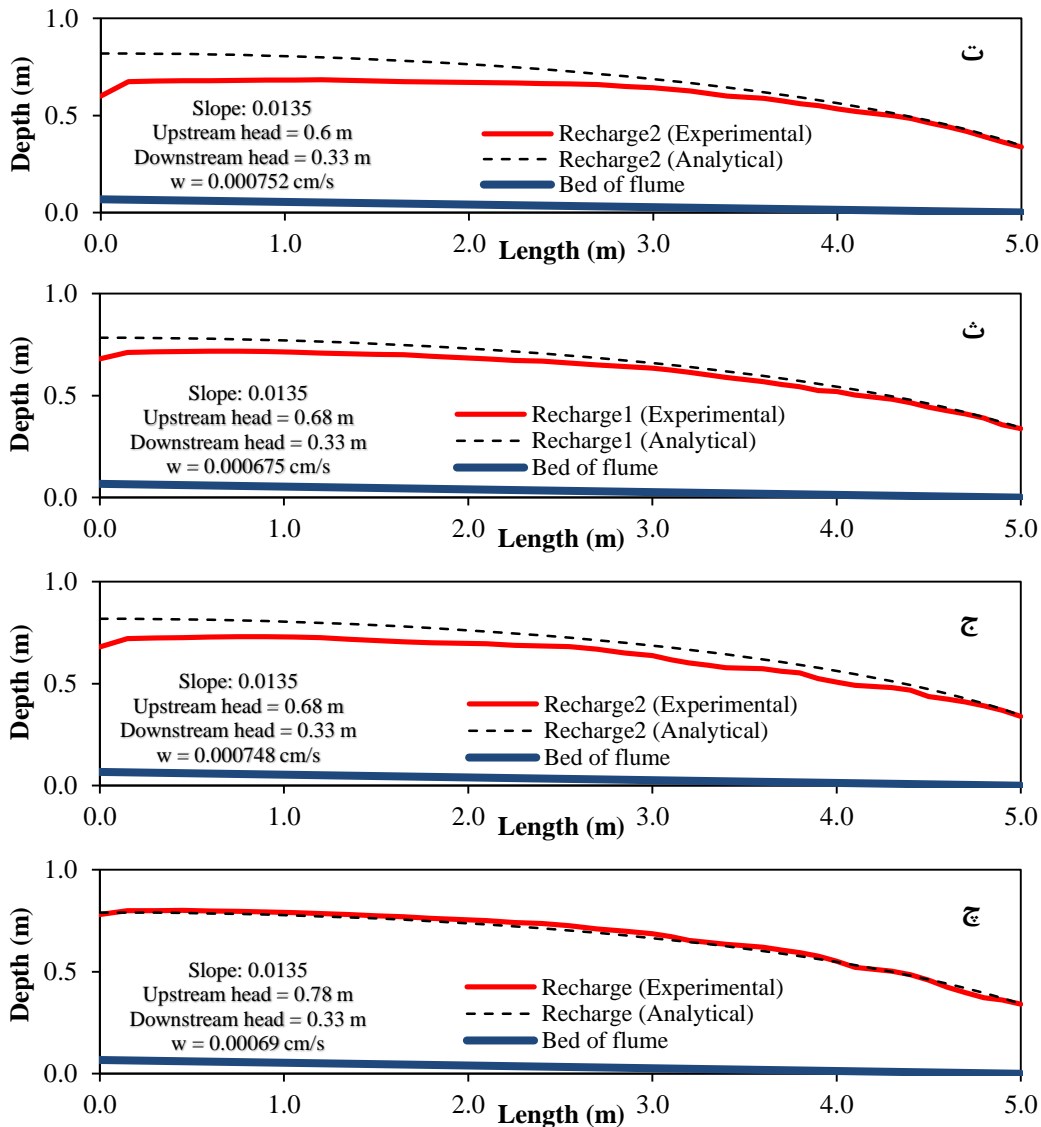
یعنی عمق آزمایشگاهی کمتر از عمق تحلیلی برآورد شده است)، می‌توان دریافت که توزیع و پراکندگی خطای نسبی در طول محیط متخلخل یکسان نمی‌باشد. بر این اساس با حرکت از سمت بالادست به سمت پایین دست میزان خطای نسبی کاهش می‌یابد که در نیمه بالایی محیط متخلخل و نزدیک به مخزن بالادست میزان خطای بیشتری مشاهده می‌شود که نشان دهنده‌ی برآورد بیشتر عمق آزمایشگاهی نسبت به عمق رابطه تحلیلی بی‌یر (۱۹۷۲) می‌باشد.

مقایسه نتایج آزمایشگاهی با رابطه تحلیلی کاسترو-ارگاز و همکاران (۲۰۱۲)

در این جا نیز از رابطه ۱۰ جهت مقایسه رابطه تحلیلی کاسترو-ارگاز و همکاران (۲۰۱۲) با داده‌های آزمایشگاهی استفاده شده است. شکل ۹ مقایسه داده‌های آزمایشگاهی با داده‌های تحلیلی را نمایش می‌دهند.

الگوی مشخص نیمرخ در همه شکل‌های رابطه تحلیلی کاسترو-ارگاز و همکاران (۲۰۱۲) گویای یک الگوی تکراری تعریف شده برای





شکل ۹- نیمرخ سطح آب مدل آزمایشگاهی و تحلیلی کاسترو- ارگاز و همکاران (۲۰۱۲)

الف) دبی ۲۳/۲ میلی لیتر بر ثانیه- ب) دبی ۲۵/۳۷ میلی لیتر بر ثانیه- پ) دبی ۲۵/۴۸ میلی لیتر بر ثانیه- ت) دبی ۲۷/۴۵ میلی لیتر بر ثانیه- ث) دبی ۲۷/۱۷ میلی لیتر بر ثانیه- ج) دبی ۲۹/۳۶ میلی لیتر بر ثانیه- چ) دبی ۳۱/۵۸ میلی لیتر بر ثانیه

یکسان می‌باشد و با بالا رفتن عمق آب در مخزن بالادست تأثیری در شکل نیمرخ رابطه تحلیلی نداشته است که به همین علت در نیمرخ حاصل از رابطه تحلیلی نقطه شروع از عمق ۰/۸ متر می‌باشد و با بالا رفتن عمق آب در تراز بالادست و نزدیک شدن به این مقدار میزان خط کاهش یافته است.

در صورتی که عمق آب در مخزن پایین دست متفاوت و شدت تغذیه زیاد شود نیمرخ حاصل از رابطه تحلیلی کاسترو- ارگاز و همکاران (۲۰۱۲) تغییر می‌کند ولی در مواردی مانند پژوهش حاضر که عمق آب در مخزن پایین دست ثابت و در همه ترازها یکسان باشد نیمرخ حاصله از رابطه تحلیلی با هم تفاوت چندانی نخواهد داشت.

طبق رابطه ۹ نیمرخ به دست آمده در رابطه تحلیلی کاسترو- ارگاز و همکاران (۲۰۱۲) بر اساس ضریب هدایت هیدرولیکی، عمق آب در مخزن پایین دست، میزان شدت بارش و طول فلوم مدل آزمایشگاهی می‌باشد.

به طور کلی می‌توان از نقاط ضعف رابطه تحلیلی کاسترو- ارگاز و همکاران (۲۰۱۲) نادیده گرفتن اثر اوج نیمرخ در مصالح ریزدانه به دلیل وجود تغذیه سطحی و همچنین نادیده گرفتن عمق آب در تراز بالادست دانست.

با دقت در شکل ۹ می‌توان به این نکته پی برد که نیمرخ حاصل از رابطه تحلیلی کاسترو- ارگاز و همکاران (۲۰۱۲)، در همه ترازها

NOF بین ۰/۰۲۳ تا ۰/۲۶۲ برای نیمرخ سطح آب، گویای این نکته است که با وجود یکسان بودن شرایط مرزی در آزمایشگاهی و رابطه تحلیلی کاسترو-ارگاز و همکاران (۲۰۱۲) اختلاف زیادی بین نتایج تحلیلی کاسترو-ارگاز و همکاران (۲۰۱۲) و آزمایشگاهی وجود دارد که در مقایسه با رابطه تحلیلی بی‌یر (۱۹۷۲) این میزان خطا بیشتر گزارش شده است. بنابراین رابطه تحلیلی بی‌یر (۱۹۷۲) برای حالت با تغذیه می‌تواند نتایج بهتری ارائه دهد.

در نهایت می‌توان به این نکته اشاره کرد که رابطه تحلیلی کاسترو-ارگاز و همکاران (۲۰۱۲) با وجود اینکه از فرضیات دوپوئی-فرشه‌ایمر استفاده کرده است اما دارای کم‌برآوردهایی است زیرا در همه ترازها نیمرخ حاصل از نتایج آزمایشگاهی بالاتر از نیمرخ حاصل از رابطه تحلیلی کاسترو-ارگاز و همکاران (۲۰۱۲) قرار گرفته است. با توجه به جدول ۳ می‌توان میزان خطای NOF رابطه‌ی تحلیلی کاسترو-ارگاز و همکاران (۲۰۱۲) با مدل آزمایشگاهی در ترازها و شدت تغذیه‌های متفاوت مشاهده کرد. طبق جدول ۳ میزان خطای

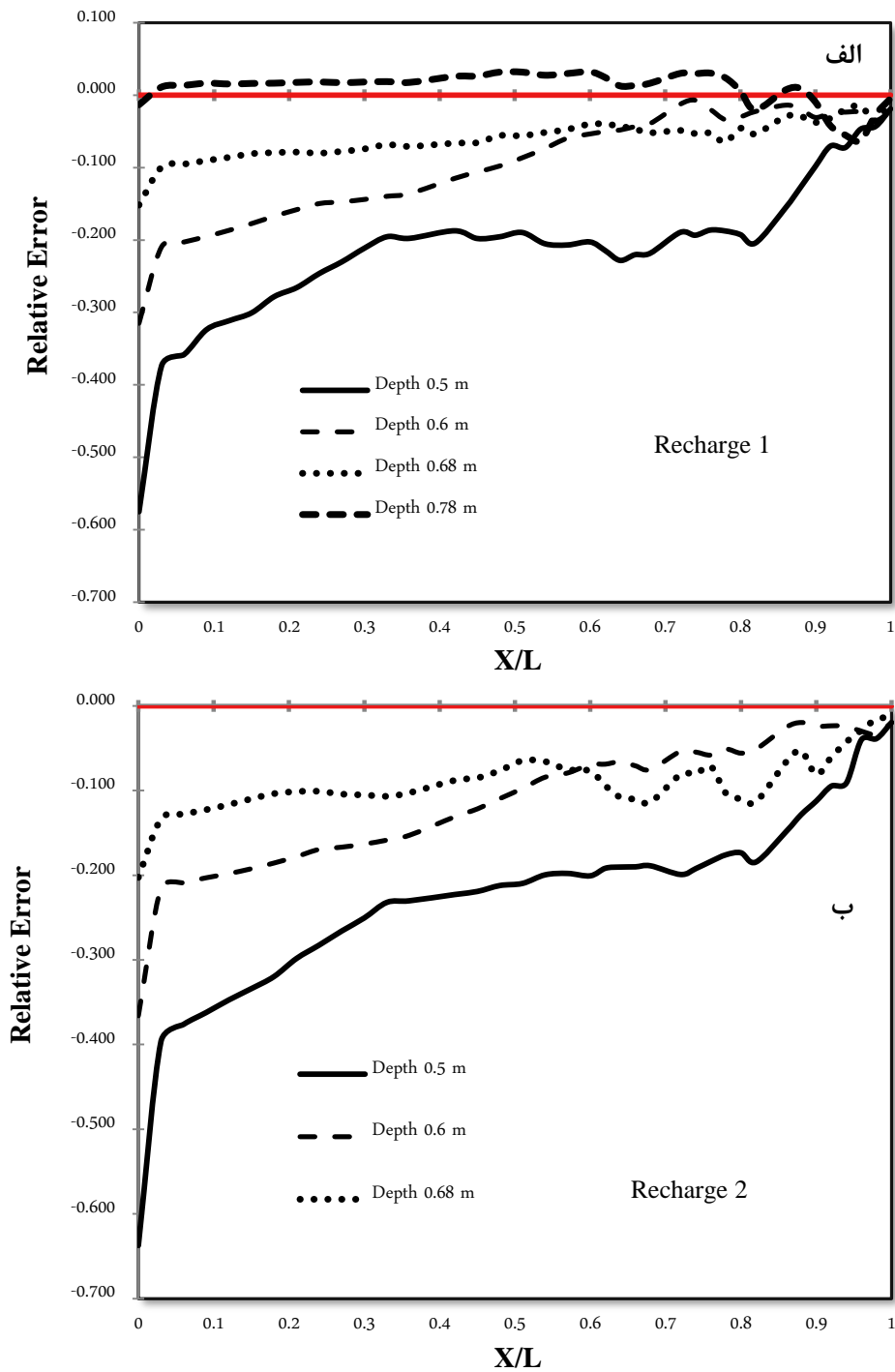
جدول ۳- میزان خطای NOF رابطه‌ی تحلیلی کاسترو-ارگاز و همکاران (۲۰۱۲) با مدل آزمایشگاهی

میزان خطای NOF	شدت تغذیه سطحی (cm/sec)	تراز آب پایین دست (m)	تراز آب بالادست (m)
۰/۲۴۵	۰/۰۰۰۶۸۴	۰/۳۳	۰/۵
۰/۲۶۲	۰/۰۰۰۷۵	۰/۳۳	۰/۵
۰/۱۲۹	۰/۰۰۰۶۸۷	۰/۳۳	۰/۶
۰/۱۴۵	۰/۰۰۰۷۵۲	۰/۳۳	۰/۶
۰/۰۷۲	۰/۰۰۰۶۷۵	۰/۳۳	۰/۶۸
۰/۱۰۴	۰/۰۰۰۷۴۸	۰/۳۳	۰/۶۸
۰/۰۲۳	۰/۰۰۰۶۹	۰/۳۳	۰/۷۸

نتیجه‌گیری

پس از مطالعه آزمایشگاهی نیمرخ و دبی نشت تحت شرایط با تغذیه سطحی، درون ماسه ریزدانه (ماسه ساحلی) همچنین ارزیابی و مقایسه با روش‌های تحلیلی، نتایج زیر حاصل شده است: پس از اعمال تغذیه سطحی، نیمرخ سطح آب بالا آمده و دبی آب عبوری به دلیل تغذیه سطحی افزایش یافته است. همچنین دبی آب عبوری پس از تغذیه بین ۰/۱ الی ۱۰ برابر افزایش نشان می‌دهد. در شرایط آزمایشگاهی پس از اعمال تغذیه سطحی نیمرخ آن در نزدیکی مخزن آب بالادست نقطه اوج دارد که علت آن را می‌توان ریز بودن مصالح و سرعت کم آب درون مصالح دانست. از مقایسه نتایج آزمایشگاهی با روابط تحلیلی بی‌یر (۱۹۷۲) و کاسترو-ارگاز و همکاران (۲۰۱۲) نتایج زیر حاصل شد: بی‌یر در سال (۱۹۷۲) رابطه‌ی ای برای دبی و نیمرخ نشت در حالت با تغذیه سطحی ارائه نموده است که پس از مقایسه نتایج این رابطه تحلیلی با نتایج حاصل از داده‌های آزمایشگاهی می‌توان نتیجه گرفت که این رابطه یکی از بهترین روابط موجود در بحث دبی و نیمرخ نشت تحت شرایط با تغذیه سطحی دانست زیرا در این رابطه کلیه‌ی شرایط مرزی، ضریب هدایت هیدرولیکی مصالح، شدت تغذیه و همچنین اثر ارتفاع اوج (h_{max}) در نظر گرفته شده است.

نتایج مندرج در جدول ۳ نشان می‌دهد که با افزایش عمق جریان و گرادیان هیدرولیکی میزان خطای NOF روش کاسترو-ارگاز و همکاران (۲۰۱۲) کاهش چشم‌گیری داشته است. به عبارت دیگر با افزایش عمق و گرادیان دقت و صحت رابطه مذکور افزایش می‌یابد. با توجه به شکل ۱۰، می‌توان دریافت که در هر دو شدت تغذیه با افزایش تراز آب بالادست خطای نسبی کاهش می‌یابد که علت آن را می‌توان عدم تاثیر پذیری عمق آب در مخزن بالادست در رابطه تحلیلی کاسترو-ارگاز و همکاران (۲۰۱۲) دانست. همچنین توزیع و پراکندگی خطای نسبی در طول محیط متخلخل یکسان نمی‌باشد و با حرکت از سمت بالادست به سمت پایین دست میزان خطای نسبی کاهش می‌یابد که در نیمه بالایی محیط متخلخل و نزدیک به مخزن بالادست میزان خطای بیشتری مشاهده می‌شود. با مشاهده شکل ۱۰ می‌توان ادعان کرد که در اکثر ترازها مقدار عمق در آزمایشگاه کمتر از عمق آب در رابطه تحلیلی برآورد شده است زیرا نمودارها در قسمت منفی قرار دارند. با دقت در نمودارها می‌توان به این نکته اشاره کرد که در شرایط آزمایشگاهی یک نقطه اوج یا بیشینه در ابتدای طول فلوم وجود دارد ولی این نقطه اوج در نمودارهای تحلیلی دیده نمی‌شود که این نکته را می‌توان به عنوان یکی از نقاط ضعف رابطه تحلیلی کاسترو-ارگاز و همکاران (۲۰۱۲) دانست، زیرا بر اساس فرضیات دوپوئی-فرشه‌ایمر در شرایط با تغذیه سطحی همیشه یک نقطه اوج وجود خواهد داشت که این امر در رابطه تحلیلی کاسترو-ارگاز و همکاران (۲۰۱۲) لحاظ نشده است.



شکل ۱۰- ترسیم گرافیکی خطای نسبی تخمین عمق نتایج آزمایشگاهی و رابطه تحلیلی کاسترو- ارگاز و همکاران (۲۰۱۲) الف) شدت تغذیه ۱ ب) شدت تغذیه ۲

شبیه‌سازی کند که علت آن را می‌توان در عدم تاثیر پذیری عمق آب بالادست در رابطه تحلیلی کاسترو- ارگاز و همکاران (۲۰۱۲) عنوان کرد.

رابطه تحلیلی کاسترو- ارگاز و همکاران (۲۰۱۲) در حالت با تغذیه سطحی تحت فرضیات دوپوئی- فرشهایمر توسعه داده بود. مقایسه نتایج رابطه تحلیلی کاسترو- ارگاز و همکاران (۲۰۱۲) با نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که رابطه تحلیلی نتوانسته نیم‌رخ نشست را

منابع

- technique. A generalized Dupuit-Forchheimer equation. *Journal of Hydraulic Research*. 48. W06516.
- Castro-Orgaz, O., Giraldez, J.V., Mateos., L. 2013. Where is the water table? A reassessment of the Dupuit-Forchheimer theory using higher order closure hypothesis. *Estudios en la Zona no Saturada del Suelo*. Vol XI.
- Chapman, T.G. 1980. Modeling groundwater flow over sloping beds. *Water Resources Research*. 16: 1114-1118.
- Chapuis, R.P. 2010. Steady state groundwater seepage in sloping unconfined aquifers. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 70 89-99.
- Childs, E.C. 1971. Drainage of groundwater resting on a sloping bed. *Water Resources Research*. 7: 1256-1263.
- Choi, E.C.C. 1983. Seepage around horizontal drains in hill slopes. *Journal of Hydraulic Engineering*. 109: 1363-1368.
- Di nucci, C. 2015. A free boundary problem for fluid flow through porous media. arXiv:1507.05547v1 [physics.flu-dyn].
- Sedghi-Asl, M., Ansari, I. 2016. Adoption of Extended Dupuit- Forchheimer Assumptions to Non-Darcy Flow Problems. *Transport in Porous Media*. 113(3): 457-468.
- Sedghi-Asl, M., Rahimi, H., Farhoudi, J., Hoorfar, A., Hartmann, S. 2014a. One-Dimensional Fully Developed Turbulent Flow through Coarse Porous Medium. *Journal of Hydrologic Engineering*. (ASCE). 19(7): 1491-1497.
- Sedghi-Asl, M., Rahimi, H., Farhoudi, J., Hartmann, S. 2014b. An Analytical Solution for 1-D Non-Darcy Flow Through Slanting Coarse Deposits. *Transp Porous Med*. 104: 565-579.
- Yates, S.R.A.W., Warrick, D.O., Lomen. 1985. Hillside Seepage. An analytical solution to a nonlinear Dupuit Forchheimer problem. *Water Resources Research*. 21: 331-336.
- انصاری، الف. ۱۳۹۱. مطالعه عددی و تحلیلی خط فریاتیکی درون زهکش‌های سنگریز. پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشگاه آزاد اسلامی واحد یاسوج.
- صدقی اصل، م، رحیمی، ح، فرهودی، ج، سامانی، ج. ۱۳۸۹. پژوهشی بر پروفیل‌های جریان متلاطم در محیط‌های سنگریز. نهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه تربیت مدرس تهران.
- صدقی اصل، م، رحیمی، ح، فرهودی، ج، سامانی، ج. ۱۳۸۹. تجزیه و تحلیل پروفیل‌های جریان درون محیط‌های متخلخل درشت‌دانه. مجله پژوهش آب ایران. ۴(۷): ۸۱-۸۸.
- صلاحی‌نیا، س. ۱۳۹۳. مطالعه آزمایشگاهی جریان زیرسطحی در شرایط تغذیه سطحی و تغییرات خاک. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه یاسوج.
- فرداد، ج. اصول زهکشی و کاربرد آن. چاپ دوم، انتشارات دانش و فن، ۱۳۸۴.
- محمودیان‌شوشتری، م. ۱۳۸۸. هیدرولیک آب‌های زیرزمینی. چاپ اول، اهواز، انتشارات دانشگاه شهید چمران.
- وزارت نیرو. شرکت مدیریت منابع آب ایران، معاونت پژوهشی و مطالعات پایه، دفتر استانداردها و معیارهای فنی، ۱۳۸۴، راهنماهای استاندارد در تغذیه مصنوعی آب‌های زیرزمینی، نشریه شماره ۱۵۰-ن.
- Bear, J. 1972. *Dynamics of Fluids in Porous Media*. Elsevier Science. New York.
- Brutsaert, W. 1994. The unit response of groundwater outflow from a hill slope. *Water Resources Research*. 30: 2759-2763.
- Castro-Orgaz, O. 2011. Steady free- surface flow in porous media. generalized Dupuit-Fawer equations. *Journal of Hydraulic Research* 49(1): 55-63.
- Castro-Orgaz, O., Giraldez, J.V., Robinson, N.I. 2012. Second-order two-dimensional solution for the drainage of recharge based on Picard's iteration

Laboratory Modeling of Drainage Problem in fine Alluvial Aquifers with Surface Recharge

S. Naderi^{1*}, M. Parvizi², M. Sedghi-Asl³

Received: Oct.17, 2018

Accepted: Jan.22, 2019

Abstract

With recharge to ground water problems and also lack of ground water resources, in this paper see page discharge and subsurface were modeled for fine-grain soil with surface recharge by a laboratory model. It was compared the results of experimental with the results of Bear (1972) and Castro- Orgaz et al (2012) analytical solutions. Laboratory model having fine porous media has 5 m long, 0.6 m wide and 1 m deep. For different water levels and bed slope of 0.0135, the seepage flow and subsurface water profile were measured under surface recharge condition and then were compared with the above- mentioned analytical solutions. Comparison seepage flow were compared with experimental seepage flows and the value of relative error were determined. Also the different between experimental and analytical results were determined means of NOF. After the comparison between experimental and analytical results, the weakness and strength of each method has been revealed. After comparison and evaluation the results of the discharge experimental with the analytical relationship Bear (1972) the relative error was between 4.2 to 6.4 percent, and then were compared with analytical relationship. The values of relative error percent and NOF function for compared and measured variables were computed.

After comparison of experimental results and analytical solutions, the weakness and strength of each method has been revealed. After comparing the results of the discharge experimental with the analytical relationship based on Dupuit- Forchheimer assumption the relative error was between 4.2 to 6.4 percent. By the comparison of the experimental results with analytical solution for Subsurface flow profile, the NOF were analytical between 0.012 to 0.048 for Chapman, 0.011 to 0.081 for Bear and 0.011 to 0.078 for Castro- Orgaz et al, respectively, which indicated a proper confirmation.

Keywords: Analytical methods, Laboratory model, Seepage discharge, Seepage line, Surface recharge

1- Graduated M.sc of Civil Engineering, Yasouj University

2- Assistant Professor of Civil Engineering, College of Engineering, Yasouj University

3- Associate Professor of Hydraulic Structures, Soil Science Department, College of Agriculture, Yasouj University

(*-Corresponding Author Email: Sadegh_Naderi71@yahoo.com)