نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۶، جلد ۱۲، بهمن - اسفند ۱۳۹۷، ص. ۱۴۹۹-۱۴۸۶

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 6, Vol. 12, Feb.-Mar. 2019, p. 1486-1499

مدل‌سازی آزمایشگاهی وضعیت زهکشی جریان در آبخوان‌های ماسه‌ای و ارزیابی روابط تحلیلی موجود

صادق نادری[۱*]، منصور پرویزی[۲]، محمد صدقی‌اصل[۳]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۳/۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۶/۲۵

چکیده

در مطالعه حاضر نشت جریان‌های زیرسطحی درون محیط متخلخل ماسه‌ای (ماسه ساحلی) با استفاده از مدل آزمایشگاهی شبیه‌سازی شده و نتایج حاصله با داده‌های حاصل از روابط تحلیلی دوپویی ت فرش‌هایمر، چاپمن، بی‌یر و کاسترو - ارگاز و همکاران مورد مقایسه قرار گرفت. مدل آزمایشگاهی شامل یک محیط متخلخل ماسه ساحلی به طول ۵ متر، عرض ۰/۶ متر و ارتفاع ۱ متر می‌باشد. برای ترازهای مختلف جریان و شیب کف فلوم برابر با ۰/۰۱۳۵، دبی نشت و نیم‌رخ نشت اندازه‌گیری گردید. 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 قوت و ضعف روابط تحلیلی مشخص گردید. از مقایسه نتایج دبی نشت آزمایشگاهی با دبی رابطه تحلیلی دوپویی ت فرش‌هایمر درصد خطای نسبی بین ۴/۲ تا ۶/۴ درصد به دست آمد. با مقایسه نتایج نیم‌رخ نشت آزمایشگاهی با روابط تحلیلی، برای رابطه چاپمن میزان خطای NOF بین ۰/۰۱۲ تا ۰/۰۴۸، برای رابطه تحلیلی بی‌یر بین ۰/۰۱۱ تا ۰/۰۸۱ و برای رابطه تحلیلی کاسترو - ارگاز بین ۰/۰۱۱ تا ۰/۰۷۸ به‌دست آمد که نشان از تطبیق مناسب بین داده‌های برداشت شده آزمایشگاهی با نتایج حاصل از روابط تحلیلی دارد.

واژه‌های کلیدی: جریان زیرسطحی، خط نشت، دبی نشت، روابط تحلیلی، مدل آزمایشگاهی

مقدمه

کشور ایران، با این‌که ۱/۱ درصد از مساحت خشکی‌های جهان را به خود اختصاص داده، فقط ۰/۳۴ درصد از آب‌های موجود در خشکی‌های جهان را در اختیار دارد. از سوی دیگر در اغلب مناطق ایران، ریزش‌های جوی اکثرا در فصل زمستان صورت می‌گیرد هم‌چنین ریزش‌های جوی به طور یکسان در کشور فرو نمی‌بارند و برخی مکان‌ها بارندگی بیش‌تر و برخی بارندگی کم‌تر دریافت می‌کنند. محدودیت منابع آب و توزیع فصلی نامناسب بارندگی نشان می‌دهد که باید ظرفیت منابع آب‌های موجود سطحی و زیرزمینی کشور به خوبی شناسایی و مطالعه کرد (صلاحی‌نیا، ۱۳۹۴).

تهیه نیم‌رخ سطح آب زیرزمینی نه تنها در بخش مهندسی ژئوتکنیک بلکه در سایر بخش‌ها نظیر بخش کشاورزی، محیط زیست، تامین آب شرب و غیره موردنیاز است. موضوع حرکت آب در محیط‌های خاکی از مهم‌ترین مسایل مورد تحقیق در زمینه جریان‌های زیرزمینی است. تاکنون تحقیقات بسیاری از جمله تحلیلی و عددی در محیط‌های مختلف خاکی و تحت شرایط متفاوت انجام پذیرفته است. در حالت کلی جریان آب در محیط‌های متخلخل به دو صورت می‌تواند شکل بگیرد. در محیط‌های متخلخل با مصالح ریز از قبیل خاک رس و لای با توجه به کم بودن سرعت جریان به صورت آرام و لایه‌ای بوده و جهت تحلیل این نوع جریان‌ها و به دست آوردن مشخصات آن‌ها از قبیل سرعت، دبی و تراز انرژی و سطح آزاد آب، از رابطه دارسی استفاده می‌شود.

دارسی مهندس فرانسوی، اولین کسی بود که یک رابطه ساختاری برای جریان درون محیط‌های متخلخل ارایه نمود. این رابطه تا حال حاضر اعتبار خویش را در موارد خاص کاربردی حفظ نموده و از مقبولیت عمومی در بین مهندسان برخوردار است (انصاری، ۱۳۹۱).

شرایط برقراری قانون **دارسی** به شرح زیر است.

جریان ماندگار باشد یعنی شدت جریان عبوری در واحد زمان

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)

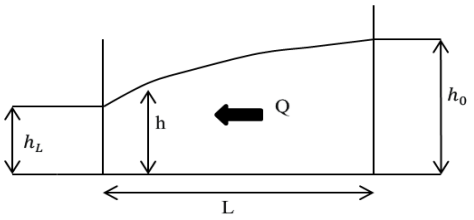
ثابت باشد، سیال غیرقابل تراکم باشد، جریان ایزوترمال باشد یعنی دمای محیط با گذشت زمان ثابت باشد، محیط تغییر شکل‌ناپذیر باشد، سرعت جریان پایین باشد، جریان آرام باشد و محیط متخلخل ریزدانه بوده و به طور کلی سنگ‌ریزه نباشد.

از نقطه نظر تشابه با جریان آب در کانال‌های روباز، جریان درون محیط‌های متخلخل را این طور تعریف می‌نمایند: این جریان‌ها اصولا 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 مولفه‌های عرضی جریان صرف‌نظر نمود. از آن‌جایی که خطوط جریان مطلقا موازی هم بوده و سطوح هم پتانسیل نیز مسطح و عمود بر جهت اصلی جریان می‌باشد. بنابراین سطوح هم پتانسیل نیز به نوبه خود با یکدیگر موازی خواهند شد. این راه حل را اولین بار دوپویی برای مطالعه جریان‌های ماندگار به داخل چاه‌ها و کانال‌ها بکار برد (فرداد، ۱۳۸۴).

دوپویی فرض کرد که:

۱- در شیب‌های کوچک یک سیستم جریان با سطح آزاد در هر مقطع قایم خطوط جریان را می‌توان افقی فرض کرد.

۲- سرعت جریان متناسب با شیب ایستابی و مستقل از عمق می‌باشد.



شکل ۱- جریان ماندگار در یک سفره آب آزاد تحت فرضیات دوپوئی

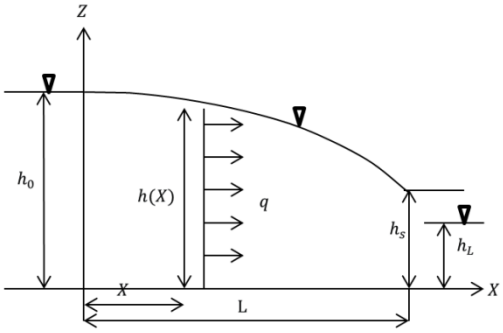
دوپویی و فرش‌هایمر در سال ۱۸۶۳رابطه‌ای را برای دبی در عرض واحد جریان ماندگار در یک سفره آب آزاد ارایه دادند که به شرح رابطه ۱ و ۲ می‌باشد (فرداد، ۱۳۸۴).

$$q = \frac{K(h_0^2 - h_L^2)}{2L} \quad (۱)$$

$$Q = q \times b \quad (۲)$$

که h_0: عمق بالادست، h_L: عمق پایین‌دست، K: ضریب هدایت هیدرولیکی، q: نرخ جریان ورودی در واحد عرض، Q: نرخ جریان ورودی (دبی)، L: طول بستر و b: عرض بستر است.

چاپمن (۱۹۵۶) بیان کرد که رابطه‌ی ارایه شده توسط دوپویی‌فرش‌هایمر (۱۸۶۳) ارتفاع صحیح سطح آب زیرزمینی را به دست نمی‌دهد. وی عقیده داشت در فرضیات دوپویی- فرش‌هایمر (۱۸۶۳)، جریان تماما افقی فرض شده و از مولفه‌ی عمودی سرعت و در نتیجه از وجود سطح تراوش در دیواره‌ی نهر پایین‌دست صرف‌نظر شده است (محمودیان شوشتری، ۱۳۸۸).



شکل ۲- جریان ماندگار در یک آبخوان باز، بین دو نهر موازی با مرزهای قایم (محمودیان شوشتری، ۱۳۸۸)

در نتیجه وی رابطه ۳ را به عنوان معادله‌ی سطح حقیقی آب زیرزمینی ارایه داد:

$$h^2 = h_0^2 - \frac{x}{L}[h_0^2 - (h_L - h_s)^2] \quad (۳)$$

که h_0: عمق بالادست، h_L: عمق پایین‌دست و h_s: ارتفاع سطح نشت است.

چیلدز 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 دوپویی‌فرش‌هایمر (Dupuit and Forchheimer., 1863) در شرایط جریان ماندگار همت گماشت. وی در تحقیق خود به ارایه روابطی تقریبی برای جریان آب زیرزمینی پرداخته و به کمک رسم نمودارهایی سعی در بیان راه‌حل‌ها داشت. چیلدز به این نکته پی برد که مقادیر کوچک تغذیه سطحی و شیب‌های بزرگ تاثیر بسزایی در حداکثر ارتفاع سطح ایستابی آب بین دو زهکش مجاور دارد (Childs., 1971).

بی‌یر در کتاب دینامیک جریان درون محیط‌های متخلخل، به ارایه‌ی روابط تحلیلی دوپوئی مربوط به جریان آب‌های زیرزمینی در دو حالت حضور و عدم حضور تغذیه سطحی پرداخت. رابطه‌ی ارایه شده توسط بی‌یر برای جریان ماندگار در آبخوان باز برای حالت عدم حضور تغذیه به صورت رابطه ۴ می‌باشد.

$$h^2 = h_0^2 - \frac{2qx}{K} \quad (۴)$$

که h_0: عمق بالادست، K: ضریب هدایت هیدرولیکی و q: نرخ جریان ورودی در واحد عرض است.

این روابط نشان می‌دهد که تقریب دوپوئی از جمله قوی‌ترین ابزارها برای پرداختن به جریان‌های آزاد می‌باشد (Bear., 1972).

چاپمن با مدل کردن جریان آب زیرزمینی بر روی بسترهای شیب‌دار و با الهام از تقریب دوپویی- فرش‌هایمر (Dupuit and Forchheimer., 1863) و بسط روابط به دست آمده توسط چیلدز (Childs., 1971) و روابط وودینگ و چاپمن (Wooding and Chapman.,1966) به ارایه مدل تقریبی سه‌بعدی و یک رابطه جدید پرداخت (Chapman., 1980).

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.

چوی، با بیان این مسئله که کاهش سطح ایستابی آب زیرزمینی در پایداری شیب بسیار اثر گذار است، به استفاده از زهکش‌های 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., 1983).

یاتس و واریک، یک راه حل تحلیلی برای مسئله غیرخطی دوپوئی- فرش‌هایمر برای نشت تپه‌های شیبدار در حالت جریان ماندگار در فضای دو بعدی که در فرم یک بعدی به تشریح آن پرداختند، ارائه دادند (Yates and Warrick., 1985).

چاپوییس، نشت 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 ساینت 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 را ارائه داده و سرانجام معادلات خاص چاپوییس (۲۰۰۵) تقریب خوبی از هدایت هیدرولیکی در مقیاس بزرگ و سرعت دارسی در طول سفره شیبدار ارائه می‌دهد (Chapuis., 2010).

کاسترو ارگاز و همکاران، به ارایه‌ی رابطه‌ای برای حالت بدون تغذیه سطحی به وسیله‌ی معادلات دوپوئی- فاور به‌دست آمده از معادلات لاپلاس در مختصات منحنی خط (با به توان بردن بعضی از ترم‌های آن به‌دست آمده است) پرداختند. ایشان با استفاده از این معادلات بیان کردند که معادلات دوپویی- فرش‌هایمر (Dupuit and Forchheimer., 1863) فرم خاصی از روابط عمومی با محدودیت فراتر از شیب‌های محلی کوچک و خطوط جریان افقی می‌باشند. رابطه‌ی تحلیلی ارایه شده به فرم رابطه ۵ می‌باشد:

$$h = \left[\frac{2}{3}\left(\frac{Q}{K}\right)^2 exp\left[-\left(\frac{1}{3}\frac{Q}{K}\right)^{-1} x\right] + 2\frac{Q}{K}\left(\frac{1}{3}\frac{Q}{K} - x\right) + h_e^2\right]^{1/2} \quad (۵)$$

که h_e: عمق بالادست، h_w: عمق پایین‌دست، K: ضریب هدایت هیدرولیکی، q: دبی در واحد عرض و L: طول بستر است (Castro-Orgaz et al., 2013).

صدقی‌اصل و همکاران با انجام مطالعاتی آزمایشگاهی به ارایه روابطی تحلیلی برای جریان دارسی و غیردارسی 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).

دی‌ناکسی مساله‌ی مربوط به مرز آزاد جریان پایای دو بعدی نشت از سد مستطیلی را که شامل به‌دست آوردن محل مرز آزاد جریان و یافتن میدان سرعت و شتاب می‌باشد، مورد بررسی قرار داد. وی در تحقیق خود به ارایه‌ی راه حل تحلیلی با استفاده از مدل تقریبی پرداخت (Di Nucci., 2015).

صدقی‌اصل و انصاری به ارائه‌ی رابطه‌ای تحلیلی برای جریان ساده‌ی کاملا توسعه یافته‌ی متلاطم (آشفته) طبق نظریه‌ی دوپویی‌فرش‌هایمر (Dupuit and Forchheimer., 1863) پرداختند. ایشان در تحقیق خویش حالت بی‌بعد رابطه را برای نشان دادن دقت راه‌حل ارائه کردند. نتایج روش آن‌ها با داده‌های آزمایشگاه و رابطه دارسی مقایسه و به این نکته پی بردند که همبستگی بسیار خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد (Sedghi-Asl and Ansari., 2016).

تاکنون یک تحقیق جامع آزمایشگاهی که شرایط مختلف زهکشی جریان 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

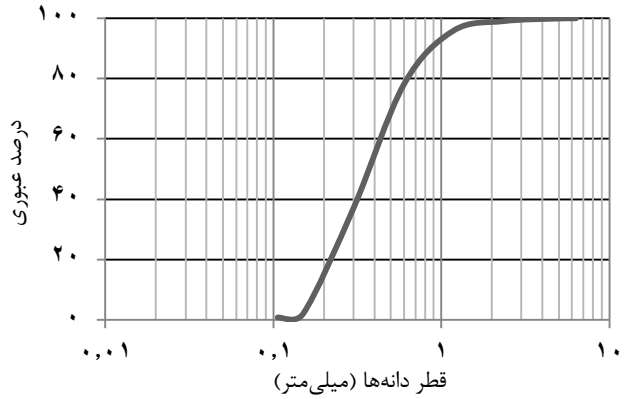
مدل آزمایشگاهی

برای بررسی حرکت آب در لایه‌های مختلف خاک مدل آزمایشگاهی به طول موثر ۵ متر، عرض۰/۶ 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 پیزومترهای شفاف با قطر کم که در کف فلوم به کار رفته اندازه‌گیری شدند. 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 کنترل کننده که در ترازهای معینی نصب شده بودند صورت گرفت. عمل تنظیم تراز آب بالادست یا پایین‌دست با بستن شیرهای کنترل‌کننده و باز گذاشتن شیر کنترل‌کننده‌ای که در تراز موردنظر بود، صورت گرفت. برای جلوگیری از شسته شدن مصالح به مخزن پایین‌دست، یک شبکه توری به شماره ۲۰۰ در حد فاصل مخزن تنظیم‌کننده مذکور و پی نصب گردید. شکل ۳ تصویر مدل آزمایشگاهی را نشان می‌دهد.

شکل۳- فلوم آزمایشگاهی

از ماسه ساحلی که از کنار ساحل رودخانه بشار یاسوج تهیه شد، برای انجام آزمایش این پژوهش استفاده شد. 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 ۰/۰۳۴ cm/s تعیین شد.



شکل ٤- منحنی دانه‌بندی ماسه ساحلی

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 آزمایش های 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، خاک مورد استفاده به صورت لایه لایه به داخل فلوم ریخته شد. سطح لایه خاک بالاتر از تراز شیر کنترل کننده قرار گرفت تا آب بتواند درون محیط خاک حرکت داشته باشد. پس از ریختن کامل مصالح به درون فلوم، تراز بالادست و پایین‌دست در تراز موردنظر تنظیم شد و سپس مخزن بالادست را تا تراز موردنظر از آب پر کرده و در نهایت با تنظیم میزان آب لوله جهت تامین آب مخزن بالادست، دستگاه جهت انجام آزمایش آماده شد. برای خاک مورد استفاده مدت زمانی حدود ۴۸ ساعت طول کشید تا آب از مخزن بالادست درون خاک جریان یافته و به مخزن پایین‌دست راه یافت و در تراز تنظیم شده از فلوم خارج گردید. طی این مدت زمان، تراز آب بالادست مرتبا کنترل و از تراز آب در مخزن بالادست اطمینان حاصل شد. فشار آب در روند آزمایش تاثیرگذار بود بنابراین فشار آب باید آن‌قدر کم و زیاد شد تا بتواند در یک تراز معین ثابت باقی بماند. پس از خروج آب از مخزن پایین‌دست، پیزومترها هواگیری شدند تا حباب های هوا به طور کامل از درون آن‌ها خارج گردد. جهت این امر، لوله ها را از روی تخته مدرج پایین آورده و روی زمین نهاده و اجازه داده شد تا حباب های هوای موجود در آن ها خارج گردد. پس از اطمینان از هواگیری کامل لوله ها، مجددا روی صفحه مدرج نصب شدند. پس از هواگیری لوله ها، پیزومترها قرائت و سپس دبی آب خروجی از درون خاک اندازه‌گیری گردید. برای افزایش دقت اندازه‌گیری میزان دبی، سه مرتبه قرائت شد و ماندگاری جریان در طول آزمایش کنترل گردید. بعد از حصول اطمینان از صحت نتایج به دست آمده، تراز آب طی دو 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 نیم رخ سطح آب درون محیط‌های خاک‌ریز تحت شیب ۰/۰۱۳۵ پرداخته شد. نتایج حاصل از آزمایش های انجام گرفته برای خاک مورد استفاده با نتایج حاصل از روابط تحلیلی دوپوئی ت فرش‌هایمر (Dupuit and Forchheimer., 1863)، چاپمن (Chapman., 1956)، بی‌یر (Bear., 1972) و کاستروـ ارگاز و همکاران (Castro- Orgaz et al., 2013) ارزیابی و مقایسه شد. با قرار دادن ابعاد و نتایج آزمایشگاهی در روابط تحلیلی ارایه شده، درصد خطای نسبی و هم چنین میزان انطباق هر کدام از روابط تحلیلی در قسمت های بعد ارایه شده است. در جدول ۱ روابط تحلیلی استفاده شده جهت مقایسه با نتایج آزمایشگاهی آورده شده است.

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

شماره رابطه تحلیلی	ارائه دهنده رابطه	مرجع	پارامترهای مورد ارزیابی
۱ و ۲	دوپوئی- فرش‌هایمر (Dupuit and Forchheimer., 1863)	(فرداد،۱۳۸۴)	دبی نشت
۳	چاپمن (Chapman., 1956)	(محمودیان شوشتری، ۱۳۸۸)	نیم‌رخ نشت (بر اساس فرضیه عمق حقیقی آب)
۴	بی‌یر (Bear., 1972)	(Bear., 1972)	نیم‌رخ نشت (فرضیات دوپویی ت فرش-هایمر)
۵	کاستروـ ارگاز و همکاران (Castro- Orgaz et al., 2013)	(Castro- Orgaz et al., 2013)	نیم‌رخ نشت (فرضیات دوپویی – فاور)

معرفی پارامترهایی جهت ارزیابی نتایج مدل آزمایشگاهی و روابط تحلیلی

با توجه به این‌که از اهداف روابط تحلیلی به دست آوردن جریان عبوری (دبی نشت) از بدنه خاک‌ریز می‌باشد به همین دلیل برای کمی سازی تفاوت بین نتایج داده های مدل آزمایشگاهی با رابطه تحلیلی از معیار آماری درصد خطای نسبی[1] (RE) به صورت رابطه ۶ استفاده شد.

$$RE = \frac{|Q_E - Q_A|}{Q_E} \times 100 \qquad (۶)$$

که در این رابطه Q_E: مقدار دبی آزمایشگاهی و Q_A: مقدار دبی

1- Relative Error

تحلیلی است.

هر چه مقدار درصد خطای نسبی بیش‌تر باشد بیانگر تفاوت بالای نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی می‌باشد و هر چه کم‌تر باشد و به صفر نزدیک‌تر باشد بیانگر همبستگی بالای نتایج آزمایشگاهی تحلیلی است.

بهترین رابطه برای به‌دست‌آوردن میزان خطای بین داده‌های آزمایشگاهی و تحلیلی استفاده از مقیاس تابع هدف نرمال (NOF)[1] است (رابطه ۷).

$$NOF = \frac{RMSE}{X} \quad (۷)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(x_i - y_i)^2}{N}} \quad (۸)$$

$$X = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} x_i \quad (۹)$$

که N : تعداد داده‌های آزمایشگاهی (تمام مشاهدات)، X : میانگین داده‌های آزمایشگاهی، x_i : مقدار هر مرحله از داده‌های آزمایشگاهی و y_i : مقدار هر مرحله از داده‌های تحلیلی است.

برای توزیع پراکندگی خطای نسبی بین نیم‌رخ آزمایشگاهی و تحلیلی از نمودار گرافیکی خطای نسبی تخمین عمق استفاده می‌شود که در آن، محور افقی آن $\frac{X}{L}$ و محور عمودی آن خطای نسبی[2] (RE) طبق رابطه ۱۰ است:

$$RE = \frac{H_E - H_A}{H_E} \quad (۱۰)$$

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 دوپویی – فرش-هایمر (Dupuit and Forchheimer., 1863)

در این پژوهش دبی آزمایشگاهی خاک مورد استفاده با دبی حاصل از رابطه‌ی تحلیلی دوپویی ت فرش‌هایمر (Dupuit and Forchheimer., 1863) (روابط ۱ و ۲) مقایسه شد. دبی به دست‌آمده از رابطه تحلیلی بر اساس ضریب هدایت هیدرولیکی، عمق آب در مخزن بالادست، عمق آب در مخزن پایین‌دست و طول فلوم می‌باشد. جدول ۲ درصد خطای نسبی در مدل آزمایشگاهی و رابطه تحلیلی دوپویی ت فرش‌هایمر (Dupuit and Forchheimer., 1863) را نشان می‌دهد.

جدول ۲ خطایی بین ۵/۲ تا ۶/۴ درصد را نشان می‌دهد. هر چه میزان این خطا کم‌تر باشد، بیان کننده این واقعیت است که مدل آزمایشگاهی و رابطه تحلیلی نزدیکی بیش‌تری داشته که میزان خطای جدول ۲ تطابق نزدیکی بین مدل آزمایشگاهی و رابطه تحلیلی را نشان می‌دهد.

با مشاهده رابطه تحلیلی دوپویی ت فرش‌هایمر (Dupuit and Forchheimer., 1863) می‌توان به این نکته پی برد تحت شرایط مرزی با افزایش ضریب هدایت هیدرولیکی مقدار دبی افزایش می‌یابد در صورتی‌که با افزایش عمق آب در تراز بالادست تغییر چندان زیادی در مقدار دبی مشاهده نمی‌شود پس می‌توان گفت که رابطه دوپویی ت فرش‌هایمر (Dupuit and Forchheimer., 1863) برای دبی مصالح پژوهش حاضر به مقدار ضریب هدایت هیدرولیکی حساس می‌باشد.

با توجه به محدودیت امکانات آزمایشگاهی، برای محاسبه ضریب هدایت هیدرولیکی نمونه‌ای از خاک را، درون دستگاه نفوذپذیری با بار ثابت قرار داده و ضریب هدایت هیدرولیکی طی سه مرحله متفاوت انجام شد و میانگین آن به عنوان ضریب هدایت هیدرولیکی نمونه کل قرار داده شد که شاید میزان خطای کم به‌وجود آمده بین نتایج آزمایشگاهی و نتایج روابط تحلیلی ناشی از عامل فوق باشد.

روش‌های آزمایشگاهی اندازه‌گیری نفوذپذیری خاک طبعا با مقداری خطا همراه هستند ولی مهم این است که آزمایش‌ها براساس شرایط استاندارد صورت بگیرند. البته برای شرایط صحرایی و درجا آزمایش‌هایی وجود دارند که قابلیت انجام در تحقیق حاضر را نداشتند.

مقایسه نتایج آزمایشگاهی با رابطه تحلیلی چاپمن (Chapman., 1956)

در این بخش از رابطه تحلیلی چاپمن (Chapman., 1956) (رابطه ۳) که بر اساس سطح ایستابی حقیقی آب زیرزمینی است، برای بررسی و مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی ماسه ساحلی استفاده شد. نیم‌رخ به دست‌آمده از این رابطه تحلیلی بر اساس عمق آب در مخزن بالادست، عمق آب در مخزن پایین‌دست، ارتفاع سطح تراوش و طول فلوم می‌باشد. شکل ۵ مقایسه نتایج داده‌های آزمایشگاهی با نتایج حاصل از داده‌های تحلیلی چاپمن (Chapman., 1956) را نشان می‌دهد.

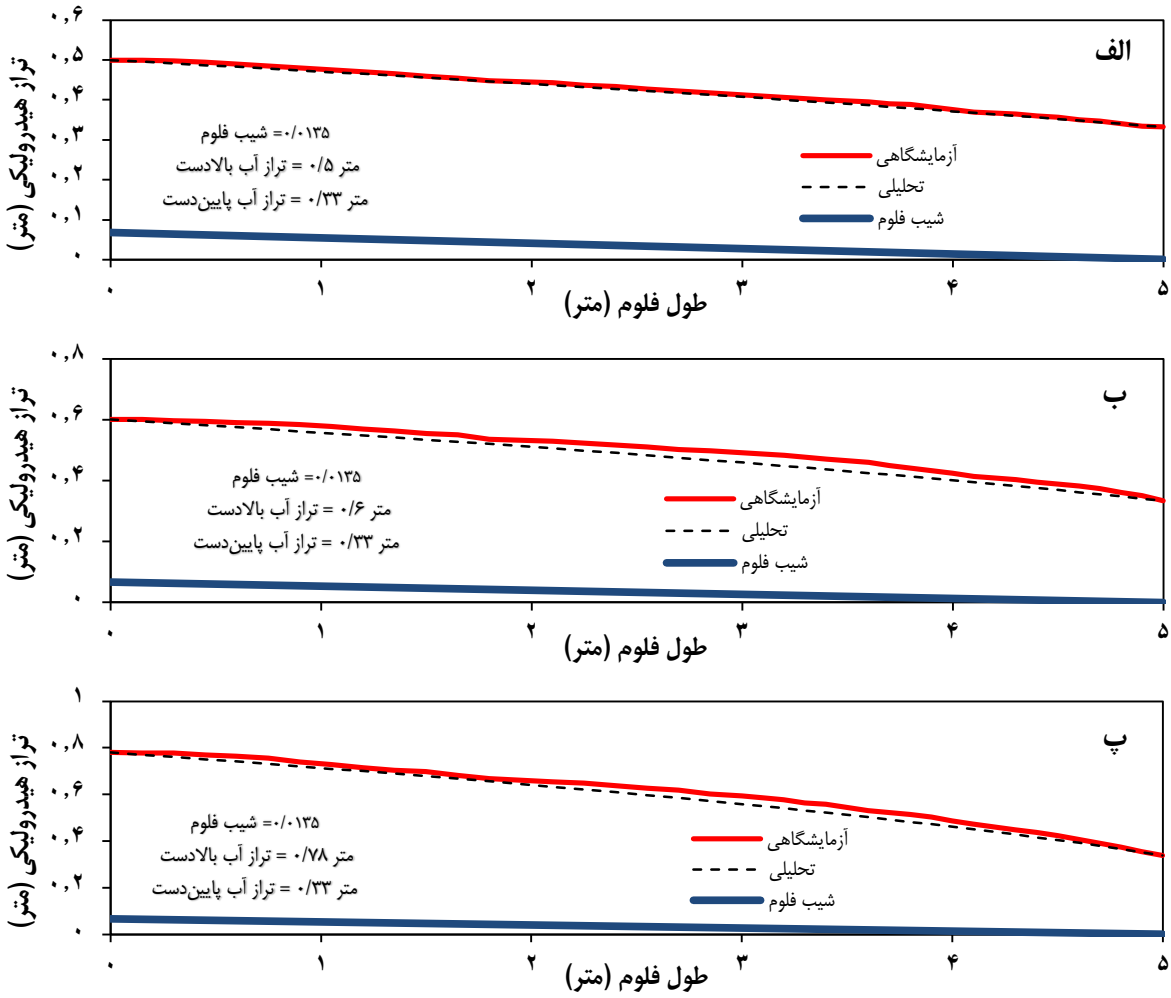
با مقایسه نیم‌رخ سطح آب مدل آزمایشگاهی با رابطه تحلیلی چاپمن (۱۹۵۶) می‌توان دریافت که نیم‌رخ آزمایشگاهی با نیم‌رخ سطح ایستابی حقیقی تطابق نزدیکی داشته به گونه‌ای که مطابق جدول ۳ میزان خطای NOF در این رابطه بین ۰/۰۱۲ تا ۰/۰۴۸ مشاهده شد.

از نقاط قوت رابطه سطح ایستابی حقیقی نسبت به سایر روابط تحلیلی مقایسه شده برای مصالح ریزدانه اثرپذیری ارتفاع سطح تراوش h_s می‌باشد که اثر این پارامتر در سایر روابط تحلیلی استفاده شده به صورت مستقیم دیده نشده است.

1- Normalized objective function
2- Relative Error

جدول ۲- درصد خطای نسبی دبی رابطه‌ی تحلیلی دوپویی – فرش‌هایمر (Dupuit and Forchheimer., 1863) با مدل آزمایشگاهی

تراز آب بالادست (m)	تراز آب پایین دست (m)	دبی نشت مدل آزمایشگاهی (ml/sec)	دبی نشت روش تحلیلی (ml/sec)	درصد خطای نسبی (RE)
۰/۵	۰/۳۳	۲/۷	۲/۸۷	۶/۳
۰/۶	۰/۳۳	۴/۸۷	۵/۱۲	۵/۱۸
۰/۷۸	۰/۳۳	۱۰/۸۸	۱۰/۱۹	۶/۳۴



شکل ۵- نیم‌رخ سطح آب مدل آزمایشگاهی و تحلیلی چاپمن (Chapman., 1956)

الف) دبی۲/۷ میلی‌لیتر بر ثانیه– ب) دبی۴/۸۷ میلی‌لیتر بر ثانیه– پ) دبی۱۰/۸۸ میلی‌لیتر بر ثانیه

جدول ۳- میزان خطای NOF رابطه‌ی تحلیلی چاپمن (Chapman., 1956) با مدل آزمایشگاهی

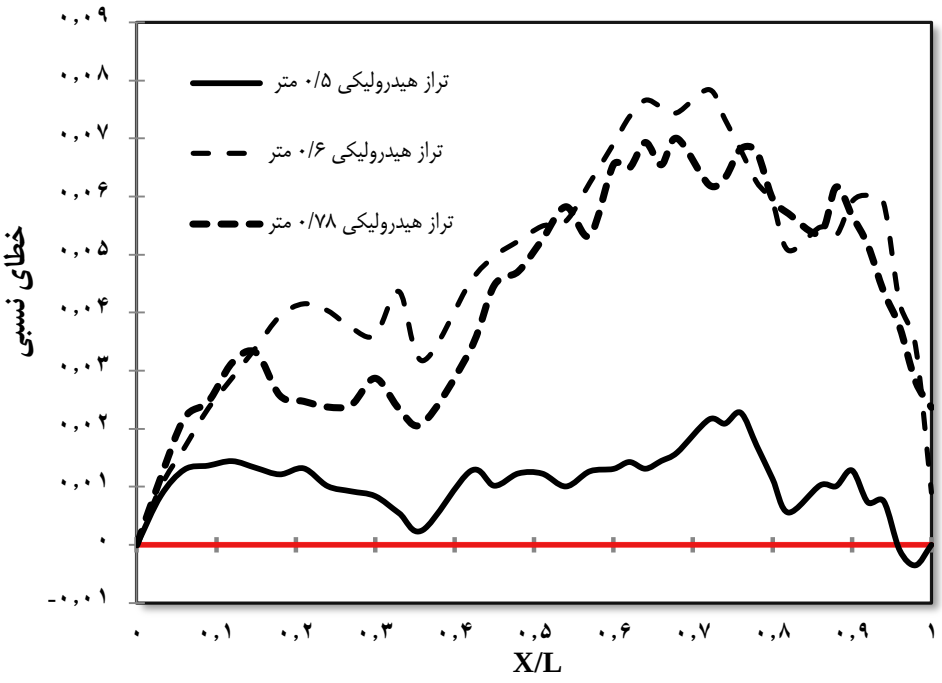
تراز آب بالادست (m)	تراز آب پایین‌دست (m)	میزان خطای NOF

۰/۰۱۲	۰/۳۳	۰/۵
۰/۰۴۸	۰/۳۳	۰/۶
۰/۰۴۰	۰/۳۳	۰/۷۸

از نقاط ضعف رابطه تحلیلی چاپمن (Chapman., 1956) می‌توان به عدم تاثیرپذیری ضریب هدایت هیدرولیکی در رابطه اشاره کرد، زیرا با توجه به ماندگار بودن جریان درون محیط متخلخل و متفاوت بودن نوع مصالح مورد آزمایش، بیش‌ترین تاثیر روی نیم‌رخ سطح آب را ضریب هدایت هیدرولیکی دارا است که این تاثیر در این رابطه نادیده گرفته شده است.

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 قسمت مثبت محور قرار بگیرد یعنی عمق آزمایشگاهی بیش‌تر از عمق تحلیلی برآورد شده است ولی اگر در قسمت منفی محور قرار بگیرد 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 پایین‌دست میزان خطای نسبی افزایش می‌یابد که در نیمه پایین محیط متخلخل و نزدیک به مخزن پایین‌دست میزان خطای بیش‌تری مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده‌ی برآورد بیش‌تر نتایج آزمایشگاهی نسبت به نتایج تحلیلی می‌باشد.

به طور کلی آن‌چه در این مقایسه قابل برداشت است این است که خطای نسبی در چهار نیم‌رخ مورد آزمایش قابل قبول است که مبین این موضوع است که رابطه تحلیلی چاپمن (Chapman., 1956) به خوبی توانسته است نیم‌رخ سطح آب حقیقی را در محیط‌های متخلخل شبیه‌سازی نماید.



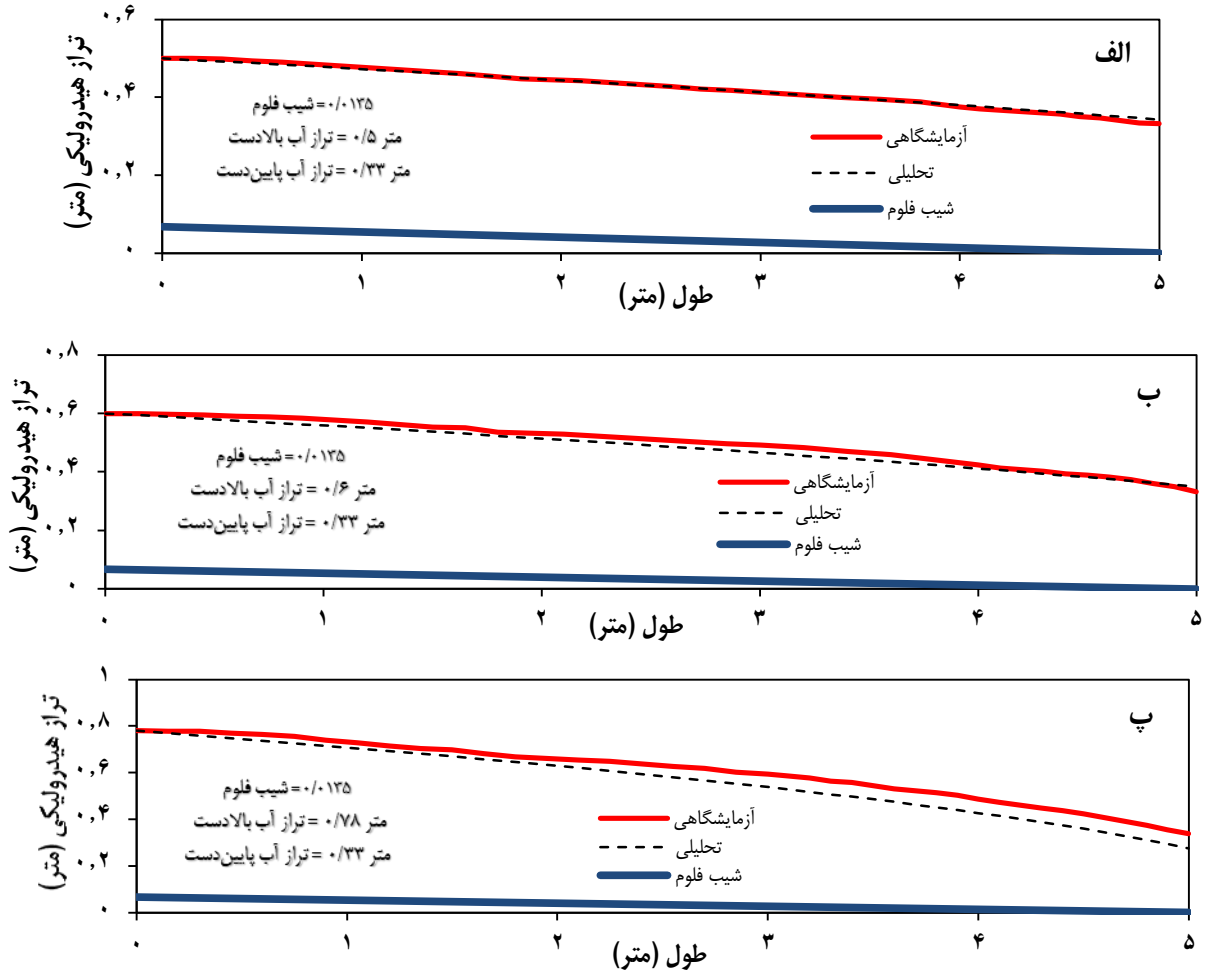
شکل ٦- خطای نسبی تخمین عمق نتایج آزمایشگاهی و رابطه تحلیلی چاپمن (١٩٥٦) در طول فلوم

مقایسه نتایج آزمایشگاهی با رابطه تحلیلی بی‌یر (Bear., 1972)

در این بخش مانند بخش‌های پیشین پژوهش داده‌های آزمایشگاهی ماسه ساحلی با داده‌های حاصل از رابطه‌ی تحلیلی رابطه ۴ مقایسه شده است. شکل ۷ مقایسه بین نیم‌رخ نتایج آزمایشگاهی با نتایج حاصل از رابطه تحلیلی بی‌یر (Bear., 1972) را نشان می‌دهد.

مطابق با رابطه ۴ نیم‌رخ به‌دست‌آمده از رابطه تحلیلی بر اساس عمق آب در مخزن بالادست، ضریب هدایت هیدرولیکی و دبی واحد عرض می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود رابطه‌ی تحلیلی بی‌یر (Bear., 1972) به خوبی توانسته نیم‌رخ سطح آب را نمایش دهد. از نقاط قوت رابطه بی‌یر (Bear., 1972) می‌توان به تاثیرپذیری ضریب هدایت هیدرولیکی در رابطه اشاره کرد. با افزایش ضریب هدایت هیدرولیکی، رابطه تحلیلی بی‌یر (Bear., 1972) عمق را بیش‌تر برآورد می‌کند یعنی این رابطه به ضریب هدایت هیدرولیکی

حساسیت بیش‌تری دارد. مطابق با جدول ۴ مقدار NOF رابطه تحلیلی بی‌یر (Bear., 1972) و نتایج آزمایشگاهی بین ۰/۰۱۱ تا ۰/۰۸۱ به‌دست آمد.



شکل ۷- نیم‌رخ سطح آب مدل آزمایشگاهی و تحلیلی بی‌یر (Bear., 1972)

الف) دبی۲/۷ میلی‌لیتر بر ثانیه- ب) دبی۴/۸۷ میلی‌لیتر بر ثانیه- پ) دبی ۱۰/۸۸ میلی‌لیتر بر ثانیه

جدول ٤- میزان خطای NOF رابطه‌ی تحلیلی بی‌یر (Bear., 1972) با مدل آزمایشگاهی

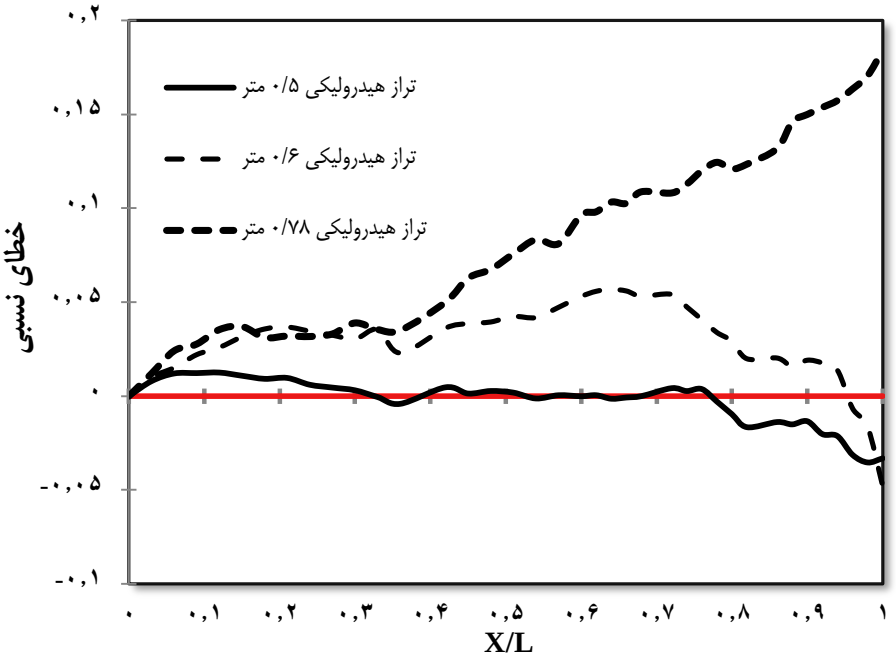
میزان خطای NOF	تراز آب پایین‌دست (m)	تراز آب بالادست (m)
۰/۰۱۱	۰/۳۳	۰/۵
۰/۰۳۶	۰/۳۳	۰/۶
۰/۰۸۱	۰/۳۳	۰/۷۸

میزان NOF به‌دست آمده از رابطه تحلیلی بی‌یر (Bear., 1972) برای ماسه ساحلی کمی بیش‌تر از NOF به دست آمده از رابطه تحلیلی چاپمن (Chapman., 1956) می‌باشد که می‌توان دریافت نتایج آزمایشگاهی به نتایج حاصل از رابطه تحلیلی چاپمن (Chapman., 1956) نزدیک‌تر می‌باشد که علت آن را می‌توان در نظر گرفتن ارتفاع سطح تراوش در رابطه تحلیلی چاپمن (Chapman., 1956) عنوان کرد.

با توجه به نتایج به‌دست آمده، مشاهده می‌شود که خطای نسبی در چهار نیم‌رخ مورد آزمایش قابل قبول است ولی توزیع و پراکندگی این خطا در طول محیط متخلخل یکسان نمی‌باشد. به طور کلی هر چه از سمت بالادست به سمت پایین‌دست حرکت می‌شود میزان خطای نسبی به طور تدریجی افزایش می‌یابد که بیش‌ترین میزان خطا در تراز ۰/۷۸ متر مشاهده شد.

خطای نسبی در ترازهای ۰/۵ و ۰/۶ متر در خروجی جریان عمق تحلیلی بیش‌تر از عمق آزمایشگاهی برآورد شد ولی در تراز ۰/۷۸ متر در خروجی جریان عمق آزمایشگاهی بیش‌تر از عمق رابطه تحلیلی بی‌یر (Bear., 1972) برآورد شد که شاید به همین علت خطای نسبی بیش‌تری در تراز ۰/۷۸ متر نسبت به سایر ترازها مشاهده شد.

هم‌چنین خطای نسبی در نیمه پایین محیط متخلخل نزدیک به خروجی جریان افزایش یافت. در حالت کلی باید اذعان کرد که رابطه تحلیلی بی‌یر(Bear., 1972) به خوبی توانسته نیم‌رخ سطح آب در محیط‌های متخلخل را شبیه‌سازی نماید.



شکل ۸- خطای نسبی تخمین عمق نتایج آزمایشگاهی و رابطه تحلیلی بی‌یر (Bear., 1972) در طول فلوم

مقایسه نتایج آزمایشگاهی با رابطه تحلیلی کاسترو – ارگاز و همکاران (Castro- Orgaz et al., 2013)

در این بخش از پژوهش، داده‌های آزمایشگاهی ماسه ساحلی با داده‌های حاصل از رابطه‌ی شماره ۵ مقایسه شدند. شکل ۹، مقایسه بین نیم‌رخ حاصل از نتایج آزمایشگاهی با نیم‌رخ حاصل از نتایج رابطه تحلیلی کاسترو – ارگاز و همکاران (Castro- Orgaz et al., 2013) را نشان می‌دهد.

شکل ۹ نشان دهنده آن است که تحت شرایط بدون تغذیه رابطه تحلیلی به خوبی توانسته نیم‌رخ سطح آب را برای ماسه ساحلی شبیه‌سازی کند. به‌علاوه آن‌چه در این شکل مشاهده می‌شود حرکت آب از بالادست به پایین دست است، که در یک مسیر خطی طی شده و می‌توان ترتیب این حرکت را در قرائت پیزومترها مشاهده کرد.

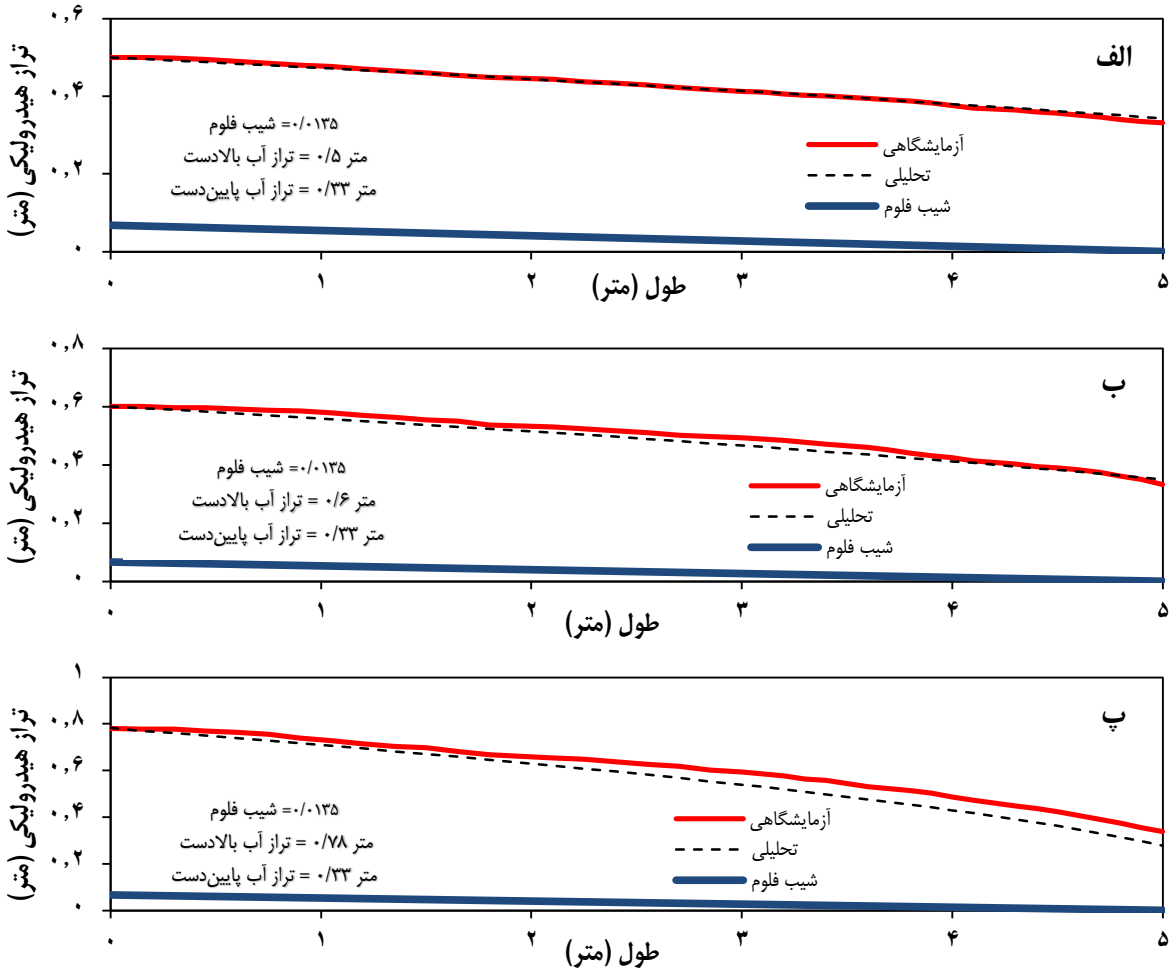
رابطه تحلیلی کاسترو – ارگاز و همکاران (Castro- Orgaz et al., 2013)، بر اساس فرضیات دوپویی – فاور توسعه داده شده است. مقایسه نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که تطابق نزدیکی بین نتایج آزمایشگاهی با نتایج رابطه تحلیلی وجود دارد. انطباق بسیار نزدیک نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی بیانگر صادق بودن فرضیات دوپویی‌فاور در محیط‌های متخلخل ماسه ساحلی است.

هم‌چنین نیم‌رخ به دست‌آمده از رابطه تحلیلی کاسترو – ارگاز و همکاران (Castro- Orgaz et al., 2013) بر اساس ضریب هدایت هیدرولیکی، عمق آب در مخزن بالادست و دبی در واحد عرض فلوم می‌باشد.

جدول ۵ میزان خطای NOF رابطه تحلیلی کاسترو – ارگاز و همکاران (Castro- Orgaz et al., 2013) با مدل آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. مطابق با جدول ۵ مقدار NOF در این حالت بین ۰/۰۱۱ تا ۰/۰۷۸ به‌دست آمد که این مقدار تقریبا با مقدار NOF رابطه بی‌یر(۱۹۷۲) برابر است که نشان دهنده انطباق کامل بین رابطه بی‌یر (Bear., 1972) با رابطه کاسترو – ارگاز و همکاران (Castro- Orgaz et al., 2013) می‌باشد.

میزان تطابق نزدیک بین رابطه تحلیلی بی‌یر (Bear., 1972) و کاسترو – ارگاز و همکاران (Castro- Orgaz et al., 2013) نشان می‌دهد رابطه تحلیلی بی‌یر (Bear., 1972) بر اساس فرضیات دوپویی ت فرش‌هایمر و رابطه تحلیلی کاسترو – ارگاز و همکاران (Castro- Orgaz et al., 2013) بر اساس فرضیات دوپویی – فاور

استوار است، نشان دهنده این موضوع است که فرضیات دوپویی ت
فرش‌هایمر با فرضیات دوپویی – فاور تطابق نزدیکی دارند.



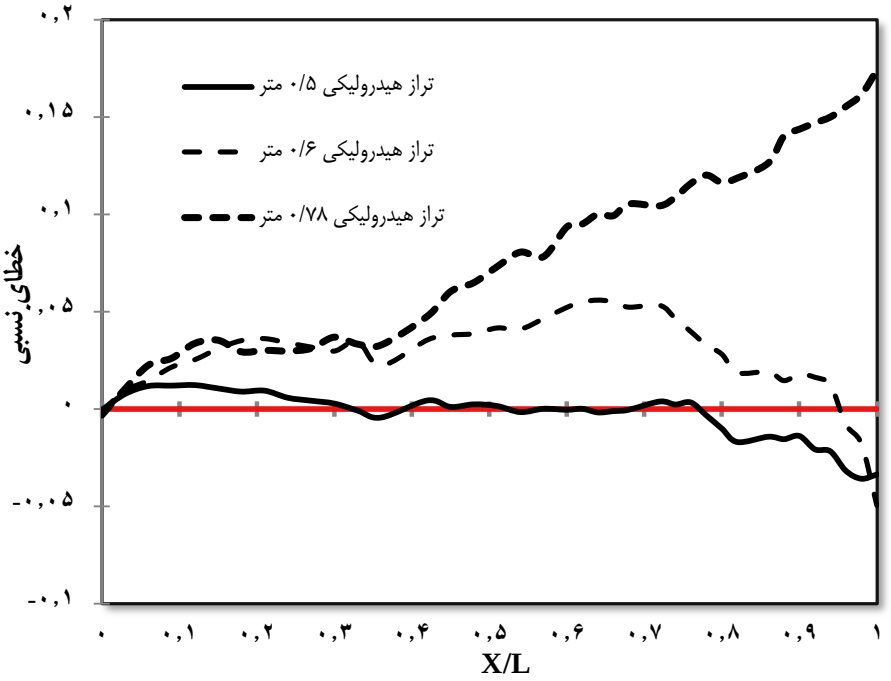
شکل ۹- نیم‌رخ سطح آب مدل آزمایشگاهی و تحلیلی کاسترو – ارگاز و همکاران (Castro- Orgaz et al., 2013)
الف) دبی۲/۷ میلی‌لیتر بر ثانیه- ب) دبی٤/٨٧ میلی‌لیتر بر ثانیه- پ) دبی ۱۰/۸۸ میلی‌لیتر بر ثانیه

جدول ۵- میزان خطای NOF رابطه‌ی تحلیلی کاسترو – ارگاز و همکاران (Castro- Orgaz et al., 2013) با مدل آزمایشگاهی

میزان خطای NOF	تراز آب پایین‌دست (m)	تراز آب بالادست (m)
۰/۰۱۱	۰/۳۳	۰/۵
۰/۰۳۵	۰/۳۳	۰/۶
۰/۰۷۸	۰/۳۳	۰/۷۸

با دقت در نتایج به‌دست آمده در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که خطای نسبی در چهار نیم‌رخ مورد آزمایش قابل قبول است ولی توزیع و پراکندگی این خطا در طول محیط متخلخل یکسان نمی‌باشد. به طور کلی هر چه از سمت بالادست به سمت پایین‌دست می‌رویم میزان خطای نسبی به طور تدریجی افزایش می‌یابد که بیش‌ترین میزان خطا در عمق ۰/۷۸ متر مشاهده شد. در حالت کلی باید اذعان کرد که رابطه تحلیلی کاسترو – ارگاز و همکاران (Castro- Orgaz et al., 2013) به خوبی توانسته نیم‌رخ سطح آب در محیط‌های

متخلخل را شبیه‌سازی نماید.



شکل ۱۰- خطای نسبی تخمین عمق نتایج آزمایشگاهی و رابطه تحلیلی کاسترو – ارگاز (Castro- Orgaz et al., 2013) در طول فلوم

نتیجه‌گیری

پس از مطالعه آزمایشگاهی نیم‌رخ و دبی نشت آب، درون ماسه ساحلی و هم‌چنین ارزیابی و مقایسه با روش‌های تحلیلی، نتایج زیر حاصل شد:

رابطه تحلیلی دوپویی ت فرش‌هایمر (Dupuit and Forchheimer., 1863) برای مقایسه دبی آزمایشگاهی به کار می‌رود که می‌توان به این نکته اذعان کرد که در بین روابط مقایسه شده در این پژوهش رابطه دوپویی ت فرش‌هایمر (Dupuit and Forchheimer., 1863) کامل‌ترین رابطه برای دبی عبوری جریان‌های آزاد می‌باشد. پس از مقایسه نتایج آزمایشگاهی و نتایج تحلیلی دوپویی ت فرش‌هایمر (Dupuit and Forchheimer., 1863) می‌توان به این نکته اشاره کرد که رابطه ارایه شده برای جریان‌های دارسی کاربرد دارد انتظار می‌رفت که نتایج قابل قبولی برای ماسه ساحلی به دست آید که پس از مقایسه نتایج آزمایشگاهی و نتایج تحلیلی این امر محقق گردید.

از رابطه تحلیلی چاپمن (Chapman., 1956) برای مقایسه نیم‌رخ نشت استفاده شد. از مقایسه این رابطه با سایر روابط تحلیلی موجود در این پژوهش می‌توان نتیجه گرفت که، استفاده از ارتفاع سطح تراوش (h_s) و هم‌چنین خطی بودن از نقاط قوت این رابطه می‌باشد.

از مقایسه نتایج رابطه تحلیلی چاپمن (Chapman., 1956) با نتایج آزمایشگاهی می‌توان به این نکته اشاره کرد که میزان خطای نسبی کم و قابل قبول می‌باشد.

رابطه تحلیلی بی‌یر (Bear., 1972) که بر اساس فرضیات دوپویی ت فرش‌هایمر توسعه داده شده برای مقایسه نتایج آزمایشگاهی استفاده شد، که در بین روابط موجود در این پژوهش، این رابطه یکی از جامع‌ترین روابط برای نیم‌رخ نشت جریان آزاد می‌باشد که میزان خطای آن قابل قبول است.

رابطه تحلیلی کاسترو – ارگاز و همکاران (Castro- Orgaz et al., 2013) بر اساس فرضیات دوپویی – فاور توسعه داده شده که نتایج به دست آمده از مقایسه نیم‌رخ نشت آزمایشگاهی نشان می‌دهد که فرضیات دوپویی – فاور می‌تواند برای شبیه‌سازی جریان آزاد به کار رود.

در مسایل نشت با سطح آزاد، مهم‌ترین عامل، کنترل مدل نیم‌رخ سطح آب است و دبی نشت در درجه دوم اهمیت قرار می‌گیرد، زیرا که دبی عملا متاثر از ضریب هدایت هیدرولیکی است و به اندازه‌گیری دقیق این پارامتر بستگی دارد.

منابع

انصاری،ا. ۱۳۹۱. مطالعه عددی و تحلیلی خط فریاتیک درون زهکش‌های سنگ‌ریز. پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشگاه آزاد اسلامی واحد یاسوج.

صدقی‌اصل،م.، حیمی،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. ۱۳۹۴. مطالعه آزمایشگاهی جریان زیرسطحی در شرایط تغذیه سطحی و تغییرات خاک. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه یاسوج.

فرداد.ح. 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 mediaت American Elsevier pub. Comp., inc. New York, 764p.

Brutsaert,W. 1994. The unit response of groundwater outflow from a hill slope. Water Resources Research. 30: 2759-2763.

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. Asociación Galega de Investigadores da Auga Universidad de Santiago de Compostela. 11: 168-173.

Chapman,T.G. 1980. Modeling groundwater flow over sloping beds. Water Resources Research. 16: 1114-1118.

Chapuis,R.P., Dallaire,V., Gagnon,F., Marcotte, D., Chouteau, M. 2007. Falling-head permeability tests in an unconfined sand aquifer. ASTM geotechnical testing journal. 30: 104-112.

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 preprint arXiv:1507.05547.

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. Transp Porous Med. 104: 565-579.

Yates,S.R., Warrick,A.W., Lomen,D.O. 1985. Hillside Seepage. An analytical solution to a nonlinear Dupuit Forchheimer problem. Water Resources Research. 21: 331-336.

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 6, Vol. 12, Feb.-Mar. 2019, p. 1486-1499

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۶، جلد ۱۲، بهمن - اسفند ۱۳۹۷، ص. ۱۴۹۹-۱۴۸۶

Laboratory Modeling of Drainage Flow Through Sandy Aquifers and Evaluation of Available Analytical Methods

S. Naderi[1*], M.r Parvizi[2], M. Sedghi-Asl[3]
Recived: May.28, 2018 Accepted: Sep.16, 2018

Abstract

In this paper, subsurface water profile and seepage discharge through fine porous media were modeled experimentally and their results were compared with the data of Dupuit- Forchheimer, Chapman, Bear and Castro- Orgaz et al. methods. Laboratory model consist of fine porous media having 5 m long, 0.6 m wide and 1 m deep. For different water levels. The seepage discharge and water profiles were measured and then were compared with analytical relationship. The values of relative error percent and NOF function for computed and measured variables were compared. After comparison of experimental results and analytical solutions, the drawbacks and capabilities of each method has been revealed. After comparing the results of the discharge experimental with the analytical relationship based on Dupuit- Forchheimer assumption analytical 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 for analytical method were 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, Subsurface flow

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)