

مطالعه آزمایشگاهی جریان با سطح آزاد در آبخوان‌های آبرفتی

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

۱- دانشجوی 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

⋮

Sadegh_naderi71@yahoo.com

خلاصه

حرکت آب در لایه‌های زیر زمین و سطح بالا آمدن آن در نقاط مختلف خاک، یکی از مسائل بسیار مهم در زمینه‌های مختلف مهندسی، کشاورزی، صنعت و غیره محسوب می‌شود. در خصوص جریان‌های زیرزمینی و پروفیل سطح آب در خاک، تاکنون تحقیقات زیادی به ویژه در قالب مدل‌های عددی و روابط تحلیلی انجام شده است، که برای ارزیابی صحت آنها به داده‌های صحرایی و آزمایشگاهی نیاز است. لیکن تاکنون یک مدل آزمایشگاهی یا فیزیکی که این مسئله را به طور دقیق مورد مطالعه قرار دهد، ارائه نشده است. در مقاله حاضر سعی شده است با طراحی و تکمیل یک فلوم آزمایشگاهی به ابعاد طول، عرض و ارتفاع به ترتیب ۵، ۰/۶ و ۱ متر، صحت روابط تحلیلی ارائه شده برای دبی و نیم‌رخ نشت برای مصالح ریزدانه روی شیب بستر ۰/۱۳۵ مورد ارزیابی و سنجش قرار گیرد. نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها، به رسم نیم‌رخ نشت به صورت خطی و همچنین تعیین دبی عبوری انجامید. پس از مقایسه نتایج آزمایشگاهی و نتایج تحلیلی، نقاط ضعف و قوت رابطه تحلیلی مشخص می‌شود. پس از مقایسه نتایج دبی خروجی آزمایشگاهی با دبی رابطه تحلیلی دوپونتی-فرشهایمر (۱۸۶۳) درصد خطای نسبی بین ۴/۲ تا ۶/۴ درصد و با مقایسه نتایج نیم‌رخ نشت آزمایشگاهی با رابطه نیم‌رخ نشت جیگر (۱۹۵۶) میزان خطای NOF بین ۰/۱۴ تا ۰/۰۵ به دست آمد که نشان از تطبیق بین داده‌های برداشت شده آزمایشگاهی با داده‌های حاصل از روابط تحلیلی دارد.

کلمات کلیدی: مدل آزمایشگاهی، جریان زیر سطحی، خط نشت، دبی نشت، روابط تحلیلی

۱. مقدمه

آب‌های زیرزمینی همواره به عنوان یکی از مهم‌ترین ذخایر آب شیرین قابل استفاده مطرح بوده است. این منابع به طور عمده از طریق حفر چاه‌های عمیق و نیمه‌عمیق، چشمه‌ها و قنوات مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند (به نقل از سعیدی و همکاران، ۱۳۹۵) [۱].

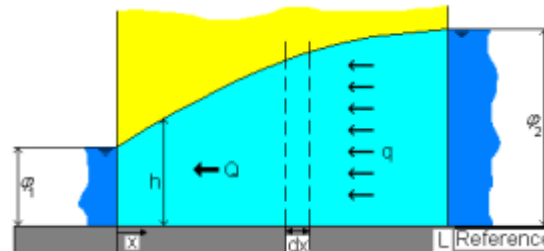
داری مهندس فرانسوی اولین کسی بود که یک رابطه ساختاری برای جریان درون محیط‌های متخلخل ارائه نمود. این رابطه تا حال حاضر اعتبار خویش را در موارد خاص کاربردی حفظ نموده و از مقبولیت عمومی در بین مهندسان برخوردار بوده است. از آنجا که قانون داری نشان دهنده ارتباط خطی بین گرادیان هیدرولیکی و سرعت جریان است، لذا ایرادهای متعددی بر این رابطه وارد است. مواردی چون یک بعدی بودن جریان، ریز بودن منافذ، اشباع و ماندگار بودن جریان درون محیط متخلخل و غیره شرایط لازم برای تصدیق قانون داری می‌باشند. در صورت عدول از شرایط ذکر شده، انحراف از آن شروع و جریان به فاز جدیدی که اصطلاحاً جریان غیر داری نامیده می‌شود، وارد می‌گردد. جریان درون محیط‌های متخلخل درشت دانه همچون بدنه سدهای سنگریزه، فیلتر سدهای خاکی، گابیون‌ها، بستر رودخانه‌های درشت دانه، زهکش‌های سنگریزه ناشی از حفر معادن و غیره به دلیل درشت بودن منافذ و بالا رفتن سرعت جریان و نیز غیر خطی شدن ارتباط بین گرادیان هیدرولیکی و سرعت از نوع غیر داری می‌باشد. جریان غیر داری طیف وسیعی از سازه‌های هیدرولیکی را در بر می‌گیرد و آگاهی از کمیت و کیفیت جریان در این گونه موارد بسیار مهم می‌باشد. (به نقل از انصاری، ۱۳۹۱) [۲].

به طور کلی رابطه داری یک رابطه تجربی- تحلیلی است و تاکنون به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته است و رابطه اساسی جریان در محیط‌های مختلف به شمار می‌رود. اما این قانون تحت شرایط خاصی صادق می‌باشد و چنانچه این شرایط تغییر کند قانون داری دیگر معتبر نمی‌باشد. شرایط برقراری قانون داری به شرح زیر است:

جریان ماندگار باشد یعنی شدت جریان عبوری در واحد زمان ثابت باشد، سیال غیر قابل تراکم باشد، جریان ایزوترمال باشد یعنی دمای محیط با گذشت زمان ثابت باشد، محیط تغییر شکل ناپذیر باشد، سرعت جریان پایین باشد، جریان آرام باشد و محیط متخلخل ریزدانه بوده و به طور کلی سنگریز نباشد. 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 می‌باشد. بنابراین سطوح هم پتانسیل نیز به نوبه خود با یکدیگر موازی خواهند شد. این راه حل را اولین بار دوپویی در سال ۱۸۶۳ برای مطالعه جریان‌های ماندگار به داخل چاه‌ها و کانال‌ها بکار برد. دوپویی 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.

شکل ۱ جریان ماندگار در یک سفره آب آزاد که فرض‌های دوپویی را نشان می‌دهد.



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

بر اساس فرضیات دوپویی- فرشهایمر در سال ۱۸۶۳، ایشان رابطه‌ای را برای دبی در عرض واحد جریان ماندگار در یک سفره آب آزاد ارائه دادند که به شرح زیر می‌باشد: (به نقل از فرداد، ۱۳۸۴) [۳].

$$q = \frac{K(h_0^2 - h_L^2)}{2L} \quad (1)$$

آبخوان برابر است:

$$Q = q \times b \quad (2)$$

که در آن K ضریب هدایت هیدرولیکی خاک، h_0 عمق آب در مخزن بالادست، h_L عمق آب در مخزن پایین دست، L طول محیط متخلخل، b عرض آبخوان، q دبی در واحد عرض و Q دبی خروجی هستند.

جیگر (۱۹۵۶) با استفاده از تقریب دوپویی- فرشهایمر معادله عمومی خود را برای سطوح آب آزاد در یک ستون عمودی فرضی از سفره آب زیرزمینی که از بالا به سطح ایستایی و از پایین به طبقه غیرقابل نفوذ محدود بوده و ارتفاع آن h است پیشنهاد نمود که رابطه ارائه شده توسط ایشان به شرح زیر می‌باشد: (به نقل از کاسترو- ارگاز ۲۰۱۱) [۴].

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

که در آن h_0 عمق آب در مخزن بالادست، h_L عمق آب در مخزن پایین دست و L طول محیط متخلخل هستند.

چیلدز در سال ۱۹۷۱ 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 دوپویی فرشهایمر 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 راه حل‌ها داشته است. چیلدز (۱۹۷۱) دریافت مقادیر کوچک تغذیه سطحی و شیب‌های بزرگ تأثیر بسزایی در حداکثر ارتفاع سطح ایستایی آب بین دو زهکش مجاور دارد [۵].

در سال ۱۹۷۲ ژاکوب بیر در کتاب دینامیک محیط‌های متخلخل، به ارائه‌ی روابط تحلیلی دوپویی مربوط به جریان آب‌های زیرزمینی در دو حالت حضور و عدم حضور تغذیه سطحی پرداخت. این روابط نشان می‌دهد که تقریب دوپویی از جمله قوی‌ترین ابزارها برای پرداختن به جریان‌های آزاد می‌باشد [۶].

در سال ۲۰۱۴ صدقی اصل و همکاران با انجام مطالعاتی آزمایشگاهی به ارائه روابطی تحلیلی برای جریان داری و غیرداری پرداختند. ایشان در این تحقیق موفق به یافتن عمق نرمال جریان درون خاکریز و همچنین رابطه‌ی میان عمق نرمال و طول محیط خاکریز به شرح زیر شدند [۷].

جریان غیرداری:

$$iL = [x(\varphi_2) - x(\varphi_1)] \times h_0 \quad (4)$$

$$X(\varphi) = \frac{1}{\cos \theta} \left[\varphi + \frac{1}{2} \ln \left(\frac{1-\varphi}{1+\varphi} \right) \right] \quad (5)$$

$$\varphi = \frac{h}{h_0} \quad \varphi_1 = \frac{h_1}{h_0} \quad \varphi_2 = \frac{h_2}{h_0} \quad (6)$$

جریان داری:

$$iL = [\psi(\eta_2) - \psi(\eta_1)] \times h_0 \quad (7)$$

$$\psi(\eta) = \frac{1}{\cos \theta} [\eta - \ln(1-\eta)] \quad \eta < 1 \quad (8)$$

$$\eta = \frac{h}{h_0} \quad \eta_1 = \frac{h_1}{h_0} \quad \eta_2 = \frac{h_2}{h_0} \quad (9)$$

که در آن h_1 عمق بالادست، h_2 عمق پایین دست، h_0 عمق نرمال، θ زاویه‌ای که با افق می‌سازد، i شیب بستر و L طول بستر هستند.

صلاحی نیا در سال 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 پروفیل‌های 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 [۸]. در سال ۲۰۱۵ دی ناکسی مسئله‌ی مربوط به مرز آزاد جریان پایای دوبعدی نشست از سد مستطیلی که شامل به‌دست آوردن محل مرز آزاد جریان و یافتن میدان سرعت و شتاب می‌باشد، را مورد بررسی قرار داد. وی در تحقیق خود به ارائه‌ی یک راه حل تحلیلی با استفاده از مدل تقریبی پرداخت [۹]. صدقی اصل و انصاری (۲۰۱۶) با توسعه فرضیات دوپوئی-فرشایمر برای شرایط جریان غیرخطی به روابط جدیدی رسیدند که صحت نتایج آن روابط را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کردند و انطباق خوبی را گزارش کردند [۱۰].

لازم به ذکر است که تاکنون مطالعات تحلیلی بسیاری در رابطه با عمق سطح آب زیرزمینی تحت شرایط تغذیه سطحی و روی بسترهای شیبدار صورت گرفته است اما هنوز نتایج و مشاهدات آزمایشگاهی خاصی در این زمینه جهت دست یابی به پاسخ‌های دقیق تر و همچنین مقایسه با روش‌ها و پاسخ‌های تحلیلی ارائه نشده است. بنابراین با توجه به نیازی که در این بخش به روش‌های آزمایشگاهی احساس گردید، تحقیق جدید دنبال رهیافتی است تا با ارائه یک مدل آزمایشگاهی با مقیاس مناسب، اثرات متغیرهایی چون شیب، نوع خاک بر شدت و کمیت سطح آب زیرزمینی مورد بررسی قرار گیرد و با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی به دست آمده از این تحقیق، فضایی برای صحت سنجی نتایج تحلیلی رایج در این زمینه ایجاد گردد. انجام این پژوهش می‌تواند عدم اطمینان‌های موجود در بحث اثر شدت و میزان نفوذ بر سطح ایستایی در حضور لایه شیبدار را به تصویر بکشاند و گامی برای تحقیقات بیشتر در زمینه جریان‌های زیر سطحی تلقی شود.

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱ 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 جداری پلیکسی گلاس ساخته و آماده گردید. در این مدل آزمایشگاهی ترازهای پیزومتریک با استفاده از پیزومترهای شفاف با قطر کم که در کف فلوم به کار رفته اندازه‌گیری شده‌اند. برای کنترل سطح آب بالادست و پایین دست 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 پایین دست توسط یک سری شیر کنترل کننده که در ترازهای معینی نصب شده بودند صورت می‌گرفت. عمل تنظیم تراز آب بالادست یا پایین دست با بستن همه شیر کنترل کننده‌ها و

باز گذاشتن شیر کنترل کننده‌ای که در تراز مورد نظر بود، صورت می‌گرفت. برای جلوگیری از شسته شدن مصالح به مخزن پایین دست، یک شبکه توری به شماره ۲۰۰ در حد فاصل مخزن تنظیم کننده مذکور و پی نصب گردید. شکل ۲ تصویر مدل آزمایشگاهی را نشان می‌دهد.



شکل ۲- نمای جانبی فلوم آزمایشگاهی پژوهش حاضر

از مصالح ریزدانه برای انجام آزمایش استفاده شده است. مصالح ریزدانه شامل ماسه تمیز ساحلی که پس از سرنده کردن با آب شسته شده تا مواد معلق و بسیار ریز از آن جدا شوند. با استفاده از آزمایش هد ثابت نفوذ پذیری ماسه ساحلی مورد استفاده برابر با 0.34 cm/s تعیین شد.

۲-۲ 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 شده و تراکم متوسطی روی آن صورت گرفته شد. سطح لایه خاک باید بالاتر از تراز شیر کنترل کننده قرار می‌گرفت تا آب بتواند درون محیط خاک حرکت داشته باشد. پس از ریختن کامل مصالح به درون فلوم، هد 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 لوله 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 بماند. پس از خروج آب از مخزن پایین دست، پیژومترها 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 لوله‌ها، مجدداً روی صفحه مدرج نصب می‌شدند. پس از هواگیری لوله‌ها، پیژومترها قرائت و سپس دبی آب خروجی از درون خاک اندازه‌گیری می‌گردیدند. برای افزایش دقت اندازه‌گیری میزان دبی، سه مرتبه قرائت انجام می‌شد و ماندگاری جریان در طول آزمایش کنترل می‌گردید.

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.

۳-۲ مقایسه نتایج آزمایشگاهی با رابطه تحلیلی

در این بخش از پژوهش به بررسی تحلیلی پروفیل سطح آب درون محیط‌های خاکریز تحت شیب 0.135 پرداخته می‌شود. در این راستا فرضیات داری برای مصالح ریزدانه به کار برده می‌شود که بدین منظور از معادله (۱) و (۲) برای دبی خروجی و معادله (۳) برای نیم‌رخ نشت استفاده می‌شود. با

قرار دادن ابعاد و نتایج آزمایشگاهی در روابط تحلیلی ارائه شده، درصد خطای و هم چنین میزان پاسخگویی هر کدام از روابط تحلیلی در قسمت‌های بعد ارائه می‌شود.

۲-۴ ارزیابی نتایج مدل آزمایشگاهی و روابط تحلیلی

با توجه به این که یکی از اهداف پژوهش حاضر به دست آوردن جریان عبوری (دبی نشت) از بدنه خاکریز می‌باشد به همین دلیل برای کمی سازی تفاوت بین نتایج داده‌های مدل آزمایشگاهی با رابطه تحلیلی از معیار آماری درصد خطای نسبی (RE) به صورت زیر استفاده می‌شود:

$$RE = \frac{|Q_E - Q_A|}{Q_E} \times 100 \quad (10)$$

که در آن Q_E مقدار دبی آزمایشگاهی و Q_A مقدار دبی تحلیلی است. هر چه RE 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 می‌باشد.

بهترین رابطه برای به دست آوردن میزان خطای بین داده‌های آزمایشگاهی و تحلیلی استفاده از مقیاس تابع هدف طبیعی NOF است. NOF نسبت میانگین مجذور خطا به X کل مربوط به داده‌های آزمایشگاهی است.

$$NOF = \frac{RMSE}{X} \quad (11)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2}{N}} \quad (12)$$

$$X = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (13)$$

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

۳. نتایج و بحث

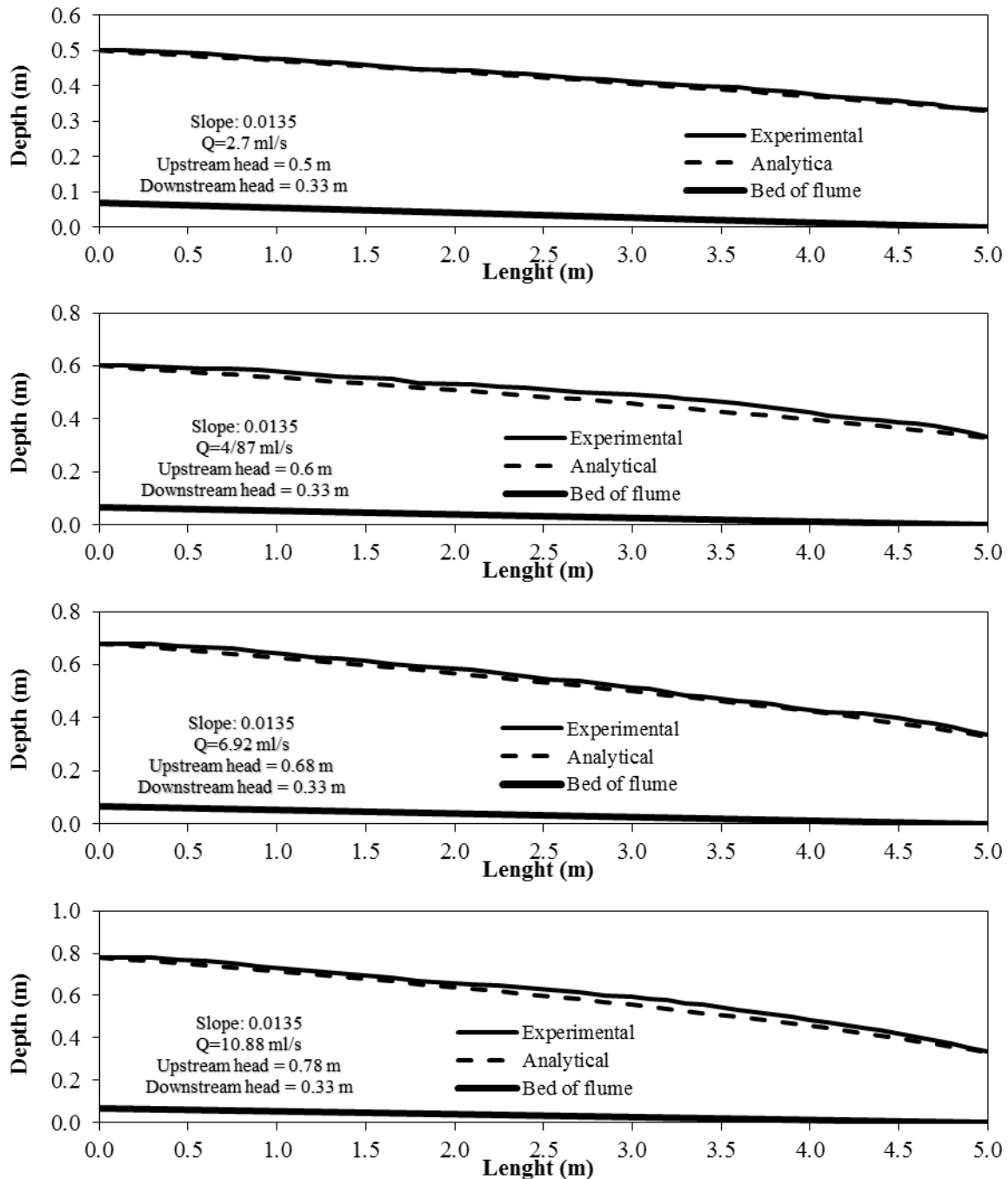
در این بخش از مقاله به ارزیابی نتایج دبی آزمایشگاهی و دبی رابطه تحلیلی دوپوئی-فرشایمر رابطه (۱) و رابطه (۲) پرداخته می‌شود. در این مقایسه نقاط ضعف و قوت رابطه تحلیلی مشخص شده و همچنین اینکه در آخر هر مرحله، مقدار خطای نسبی حاصله از مدل آزمایشگاهی و رابطه تحلیلی برای شرایط مختلف هیدرولیکی (شرایط مرزی) با استفاده از رابطه (۱۰) مشخص و ارائه می‌گردد. دبی به دست آمده از رابطه تحلیلی بر اساس ضریب هدایت هیدرولیکی، عمق آب در مخزن بالادست، عمق آب در مخزن پایین دست و طول فلوم می‌باشد. در جدول (۱) تراز آب بالادست، تراز آب پایین دست، دبی در مدل آزمایشگاهی، دبی در رابطه تحلیلی و درصد خطای نسبی درج شده است.

جدول ۱- درصد خطای نسبی دبی رابطه تحلیلی دوپوئی-فرشایمر با مدل آزمایشگاهی مصالح ریزدانه

درصد خطای نسبی (RE)	دبی در راه تحلیلی (ml/sec)	دبی در مدل آزمایشگاهی (ml/sec)	تراز آب پایین دست (m)	تراز آب بالادست (m)
۶/۳	۲/۸۷	۲/۷	۰/۳۳	۰/۵
۵/۱۸	۵/۱۲	۴/۸۷	۰/۳۳	۰/۶
۴/۱۹	۷/۲۱	۶/۹۲	۰/۳۳	۰/۶۸
۶/۳۴	۱۰/۱۹	۱۰/۸۸	۰/۳۳	۰/۷۸

رابطه (۱) از ترکیب قانون دارسی و معادله پیوستگی به دست آمده است. این جدول خطایی بین ۴/۲ تا ۴/۶ درصد را نشان می‌دهد که میزان خطای جدول ۱ تطابق نزدیکی بین مدل آزمایشگاهی و رابطه تحلیلی را نشان می‌دهد. مقدار دبی جدول ۱ نشان می‌دهد که به جز تراز ۰/۷۸ متر در بقیه ترازها دبی

تحلیلی بیشتر از مقدار آزمایشگاهی به دست آمده است. به دلیل وجود عدم اطمینان‌های زیادی که در قبیل جریان زیرسطحی وجود دارد این میزان تطبیق بین رابطه تحلیلی و نتایج آزمایشگاهی پژوهش حاضر، قابل قبول توصیف می‌شود. در این بخش از مقاله داده‌های آزمایشگاهی مصالح ریزدانه با داده‌های حاصل از رابطه تحلیلی جیگر که بر اساس فرضیات دوپوئی - فرشایمر می‌باشد (رابطه ۳) برای تحلیل شرایط آزمایشگاهی استفاده شده است. نیم‌رخ به دست آمده از این رابطه تحلیلی بر اساس عمق آب در مخزن بالادست، عمق آب در مخزن پایین دست و طول فلوم می‌باشد. در شکل (۳) نیم‌رخ آزمایشگاهی و نیم‌رخ حاصل از رابطه تحلیلی برای هر کدام از ترازها رسم شده‌است.



شکل ۳- نیم‌رخ سطح آب مدل آزمایشگاهی و تحلیلی جیگر مصالح ریزدانه الف) دبی ۲/۷ میلی لیتر بر ثانیه - ب) دبی ۴/۸۷ میلی لیتر بر ثانیه - پ) دبی ۶/۹۲ میلی لیتر بر ثانیه - ت) دبی ۱۰/۸۸ میلی لیتر بر ثانیه

در جدول ۲ تراز آب بالادست، تراز آب پایین دست و میزان خطای NOF نیم‌رخ آزمایشگاهی و داده‌های تحلیلی آورده شده است:

جدول ۲ ارزیابی میزان خطای NOF رابطه‌ی تحلیلی جیگر با نتایج مدل آزمایشگاهی مصالح ریزدانه

تراز آب بالادست (m)	تراز آب پایین دست (m)	میزان خطای NOF
۰/۵	۰/۳۳	۰/۰۱۴
۰/۶	۰/۳۳	۰/۰۵
۰/۶۸	۰/۳۳	۰/۰۲۷
۰/۷۸	۰/۳۳	۰/۰۴۵

با دقت در نمودارهای شکل (۳) که نیم‌رخ سطح آب مدل آزمایشگاهی و تحلیلی جیگر را نشان می‌دهد، این نکته قابل بیان است که داده‌های حاصل از مدل آزمایشگاهی تقریباً بر روی داده‌های حاصل از رابطه تحلیلی (۳) منطبق شده‌اند.

رابطه تحلیلی جیگر بر اساس فرضیات دوپوئی-فرشهایمر به دست آمده است، که معادله (۳)، معادله یکی سهمی است که شکل سطح آب زیرزمینی را بیان می‌کند. به علت شرایط مرزی که در استخراج آن به کار رفته، سهمی آب زیرزمینی از دو انتهای منطقه‌ی جریان می‌گذرد.

جدول (۲) میزان خطای NOF در مدل آزمایشگاهی و رابطه تحلیلی را بین ۰/۰۱۴ تا ۰/۰۵ نشان می‌دهد. با مقایسه نیم‌رخ سطح آب مدل آزمایشگاهی با رابطه تحلیلی می‌توان دریافت که الگوی مشخصی تکرار شده است که بیان کننده این واقعیت است که مدل آزمایشگاهی و رابطه تحلیلی نزدیکی زیادی داشته است.

از نقاط ضعف رابطه تحلیلی می‌توان به عدم تاثیرپذیری ضریب هدایت هیدرولیکی در رابطه اشاره کرد زیرا ضریب هدایت هیدرولیکی در مصالح متفاوت است و این تفاوت در نیم‌رخ سطح آب برای خاک‌ها قابل شهود است.

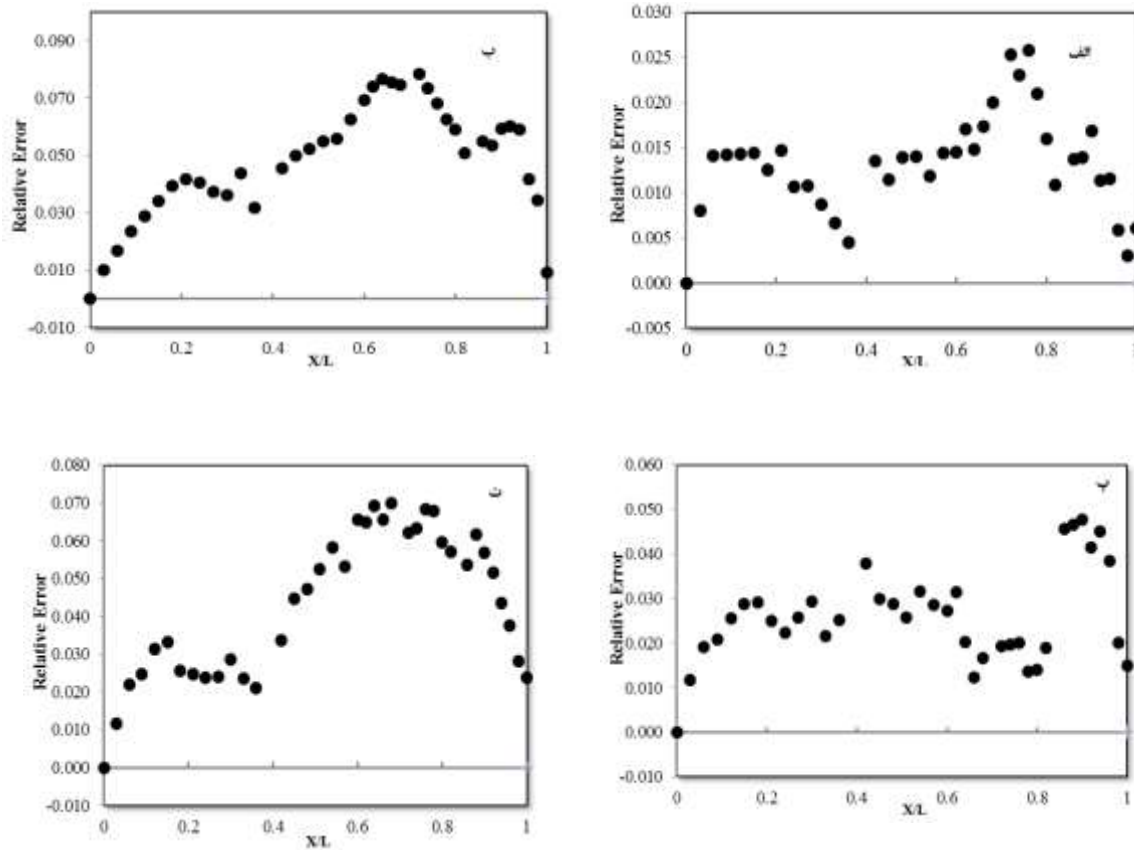
معادله (۳) ارتفاع صحیح سطح آب زیرزمینی را به دست نمی‌دهد. علت این است چون فرضیات دوپوئی-فرشهایمر جریان به طور کلی افقی فرض شده و از مولفه عمودی سرعت و در نتیجه از وجود سطح تراوش در دیواره نهر پایین دست صرف نظر شده است (به نقل از محمودیان شوشتری ۱۳۸۹) [۱۱].

برای توزیع پراکندگی خطای نسبی بین نیم‌رخ آزمایشگاهی و تحلیلی از شکل (۴) استفاده شده است که محور افقی آن بر حسب $\frac{x}{L}$ و محور عمودی آن بر حسب خطای نسبی (RE) مطابق با رابطه زیر می‌باشد.

$$RE = \frac{H_E - H_A}{H_E} \quad (14)$$

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

با اندکی دقت در نتایج به دست آمده در شکل (۴) 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 پایین دست حرکت می‌شود تعداد خطای نسبی به طور تدریجی افزایش می‌یابد و در نیمه پایین محیط متخلخل نزدیک به خروجی جریان میزان خطا افزایش یافته است. در حالت کلی باید اذعان کرد که رابطه تحلیلی جیگر (۱۹۵۶) به خوبی توانسته نیم‌رخ سطح آب در محیط‌های متخلخل ریزدانه شبیه سازی نماید.



شکل ۴- ترسیم گرافیکی خطای نسبی تخمین عمق آب مصالح ریزدانه
 (الف) تراز ۰/۵ متر (ب) تراز ۰/۶ متر (پ) تراز ۰/۶۸ متر (ت) تراز ۰/۷۸ متر

۴. نتیجه گیری

در مسائل نشت با سطح آزاد، مهمترین عامل کنترل مدل، پروفیل سطح آب است. دبی نشت در مرحله دوم قرار می گیرد، زیرا که دبی عملاً متأثر از ضریب هدایت هیدرولیکی است و به اندازه گیری دقیق این پارامتر بستگی دارد.

نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که رابطه تحلیلی دوپوئی- فرشهیمر به خوبی می تواند جوابگوی دبی خروجی مصالح ریزدانه باشد. میزان درصد خطای نسبی دبی بین ۴/۲-۶/۴ نشان دهنده ی تطابق نزدیک بین داده های آزمایشگاهی و دبی حاصل از رابطه تحلیلی می باشد. لذا مهندس طراح باید دقت لازم و کافی را در طراحی و محاسبات نشت مبذول داشته باشد.

با مقایسه نیم رخ مدل آزمایشگاهی و رابطه تحلیلی جیگر (۱۹۵۶) و همچنین مقدار *NOF* به دست آمده از مقایسه این دو نیم رخ مشاهده می شود که انطباق خوبی بین نتایج رابطه تحلیلی و نتایج آزمایشگاهی تحقیق حاضر وجود دارد. همچنین در تفسیر نتایج این تحقیق برای کلیه مدل های شبیه سازی شده، باید به این نکته مهم اشاره داشت که جریان درون مصالح ریزدانه و روابط تحلیلی مورد نظر بر اساس قانون دارسی است که به همین علت جواب های رابطه تحلیلی و آزمایشگاهی به هم نزدیک است.

۵. مراجع

۱. سعیدی، ح. اکبرپور، الف. باغوند، الف. نیک‌سخن، م. ح. صادقی طبسی، ص. (۱۳۹۵). ارائه مدل شبیه‌ساز- بهینه‌ساز کمی و کیفی بهره‌برداری از آبخوان به منظور تعدیل غلظت آلاینده‌ها با استفاده از الگوریتم فاخته. نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، جلد بیست و سوم، شماره پنجم، ۸۷-۱۰۳.
۲. انصاری، الف. (۱۳۹۱). مطالعه عددی و تحلیلی خط فریاتیگ درون زهکش‌های سنگریز، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد یاسوج، یاسوج.
۳. فرداد، ح (۱۳۸۴). اصول زهکشی و کاربرد آن. چاپ دوم. تهران: انتشارات دانش و فن.
4. Castro- Orgaz, O. (2011). Steady free- surface flow in porous media: generalized Dupuit- Fawer equations. *Journal of Hydraulic Research* 49(1): 55-63.
5. Childs, E.C. (1971). Drainage of groundwater resting on a sloping bed. *Water Resources Research*, 7: 1256-1263.
6. Bear, j. (1972). *The dynamics of fluids in porous media*. Elsevier, New York.
7. 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.
۸. صلاحی نیا، س. (۱۳۹۳). مطالعه آزمایشگاهی جریان زیرسطحی در شرایط تغذیه سطحی و تغییرات خاک، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه یاسوج، یاسوج.
9. 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.
10. Di nucci, C(2015). A free boundary problem for fluid flow through porous media. arXiv:1507.05547v1 [physics.flu-dyn]
۱۱. محمودیان شوشتی، م. (۱۳۸۸). هیدرولیک آب‌های زیرزمینی. چاپ اول. اهواز: انتشارات دانشگاه شهید چمران.