تحقیقات منابع آب ایران
Iran-Water Resources Research

سال پنجم، شماره ۲، پائیز ۱۳۸۸
Volume 5, No. 2, Fall 2009 (IR-WRR)
۶۲-۷۰

شبیه سازی جریان آب در محیط متخلخل با سطح آزاد با بهره‌گیری از مدل شبکه ترکیبی
۱- آنالیز شبکه ترکیبی

سید حسین افضلی [۱*]، محمد جواد عابدینی [۲] و پرویز منجمی [۳]

چکیده
شبیه‌سازی جریان در محیط متخلخل، کاربردهای متعدد و متنوعی در طراحی سدهای پاره سنگی، فیلترهای شنی، بهره‌برداری موثر از منابع آب زیرزمینی و مخازن نفت دارد. ظرف صد سال گذشته، تلاش‌های متعددی به منظور شبیه سازی جریان در محیط متخلخل با بهره‌گیری از قوانین دارسی و غیر دارسی صورت پذیرفته است. به لحاظ ماهیت جریان که بخشی از دامنه فیزیکی تحت فشار و نواحی مجاور سطح آزاد در معرض فشار جو می‌باشد، در این تحقیق مدل ترکیبی تحت فشار–سطح آزاد متشکل از شبکه‌ای از مجاری به هم پیوسته به منظور شبیه‌سازی جریان توصیه گردیده است. در مدل مزبور به دلیل اینکه لوله‌ها در اطراف شبکه باز و در ارتباط با اتمسفر می‌باشند، امکان ایجاد فشار منفی در کل شبکه وجود ندارد و به محض اینکه در نقطه‌ای از جریان، فشار منفی گردد، هوا وارد سیستم می‌شود. با توجه به این ویژگی، آنالیز چنین شبکه‌ای با استفاده از روشهای معمول مقدور نبوده و لذا هدف این مقاله، تدوین و ارائه روشی جهت آنالیز این نوع شبکه‌های ترکیبی می‌باشد. در ادامه به منظور ارزیابی و بررسی صحت و سقم فرض‌های بکار رفته در روش پیشنهادی و مدل کامپیوتری مربوطه، مبادرت به ساخت مدل آزمایشگاهی شبکه نظیر در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی دانشگاه شیراز گردیده است. مقادیر گذر حجمی و پروفیل سطح آب در شرایط ماندگار برای مقادیر مختلف عمق بالادست پایش گردیده و از بانک اطلاعاتی بدست آمده برای واسنجی و ارزیابی اعتبار مدل تبیینی استفاده موثر بعمل آمده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی دلالت بر انطباق نسبتاً مناسب مقادیر مشاهده‌ای و محاسبه شده و نهایتاً صحت روش پیشنهادی دارد.

کلمات کلیدی: جریان غیردارسی، جریان درون سنگریزه، مدل شبکه‌ای، محیط متخلخل

تاریخ دریافت مقاله: ۲ تیر ۱۳۸۶
تاریخ پذیرش مقاله: ۲۰ تیر ۱۳۸۸

۱- عضو هیئت علمی، بخش معماری، دانشکده هنر و معماری دانشگاه شیراز
۲- عضو هیئت علمی، بخش راه وساختمان، دانشکده مهندسی دانشگاه شیراز
۳- عضو هیئت علمی، بخش راه وساختمان، دانشکده مهندسی دانشگاه شیراز
*- نویسنده مسئول

Simulation of Flow in Porous Media Using Coupled Pressurized-Free Surface Interconnected Conduit Network
1- Network Analysis

S. H. Afzali [1], M. J. Abedini [2], and P. Monadjemi [3]*

Abstract
Simulation of fluid flow in porous media has a wide range of applications including design of rockfill embankments, design of sand filters, or efficient management of ground water and oil reservoirs. Various efforts have been made during the past century to conduct such simulation modeling using both Darcy and non-Darcy laws. The nature of flow in porous media consists of a part which is under pressure and another part near the phreatic line which is exposed to atmosphere. Accordingly, a coupled pressurized-free surface flow model should be conceptualized using the network of pore body and pore throat. An effective modeling tool like an open source public domain software can then be used. In this study EPANET was modified to accommodate the nature of flow involved. For the verification purposes, a physical model was built in the Hydraulic Lab at the School of Engineering in Shiraz University. Steady state water surface profile and outflow discharge were monitored for different upstream water levels. This data were then used to calibrate and validate the developed computer model. Results showed that a satisfactory agreement between computer model and experimental records can be obtained for a wide range of upstream flow conditions. In a majority of cases, computer model captures more than 99% of variability in observed outflow discharge or water surface profile.

Keywords: Non-Darcy flow, Flow through rockfill, Network model, EPANET, Porous media.

1- Assistant Prof. Dept. of Architectural Engineering, School of Art and Architecture, Shiraz University, Shiraz, Iran. Email: afzali@shirazu.ac.ir
2- Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, School of Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran. Email: abedini@shirazu.ac.ir
3- Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, School of Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran. Email: monadjemi@shirazu.ac.ir
*- Corresponding Author

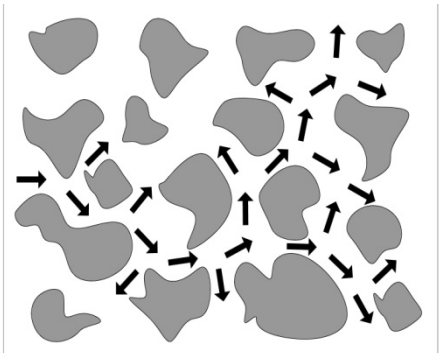
Archive of SID

www.SID.ir

۱- مقدمه

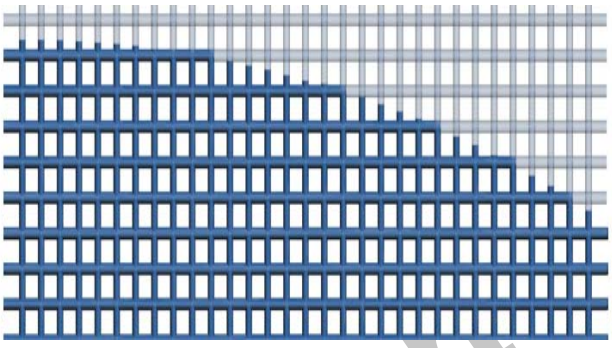
بررسی جریان سیال درون محیط متخلخل، کاربردهای فراوانی در شاخه‌های مختلف علوم مهندسی دارد. جریان آب در سدهای سنگریزه‌ای، بندهای انحرافی سنگریزه‌ای، موج‌شکن‌ها، فیلترها و گابیون‌ها مثالهای بارزی در این زمینه محسوب می‌شوند. در این راستا، به منظور بررسی جریان سیال در مخازن زیرزمینی، جریان درون فیلترهای شنی، حرکت شیرابه فاضلاب و دیگر آلاینده‌های مختلف درون زمین و حرکت نفت خام در مباحث مربوط به مهندسی مخازن نفت، تحلیل جریان درون محیط‌های متخلخل ضرورت پیدا می‌کند. تا قبل از دهه اخیر، به دلیل پیچیدگی‌های زیاد جریان درون محیط‌های متخلخل و همچنین عدم امکان اندازه‌گیری پارامترهای مختلف هیدرولیکی جریان در بین ذرات، در اکثر قریب به اتفاق تحقیقاتی که در این زمینه صورت پذیرفته، کل محیط متخلخل به صورت یک سیستم کنترل در نظر گرفته شده و براساس نتایج حاصل از مشاهدات آزمایشگاهی، نسبت به ارائه روابط تجربی بین گرادیان هیدرولیکی و سرعت جریان اقدام گردیده است. (Li et al., 1998; Hosseini, 1997; Herrera and Felton,1991; Stephenson, 1979; Ward, 1964)

در دهه اخیر، به دلیل نیاز به بررسی جریان‌های دو و یا سه بعدی و تحلیل برخی از پیچیدگی‌های آنها و همچنین وجود محدودیت‌های فراوان در مدل‌های تجربی قبلی، استفاده از مدل‌های شبکه‌ای مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است (Archarya et al., 2004; Al-Raoush et al., 2003; Wang et al., 1999; Thauvin and Mohanty, 1998) . در این مدل‌ها، محیط متخلخل به صورت شبکه‌ای از حفره‌ها و مجاری بهم پیوسته در نظر گرفته شده (شکل ۱) و با همانندسازی هر مجرا با یک لوله، به گونه‌ای که محل اتصال این لوله‌ها نقش حفره را ایفا کند، کل محیط به صورت یک شبکه لوله‌ای شبیه‌سازی می‌گردد (Held and Ceila, 2001a, b; Fischer and Celia, 1999).



شکل ۱- طبیعت رفتار جریان درون حفره‌های محیط متخلخل

در راستای بررسی جریان آشفته درون محیط‌های سنگریزه‌ای درشت دانه با سطح آزاد[1] با استفاده از تئوری حاکم بر مدل‌های شبکه‌ای، به دلیل آنکه مجاری و حفره‌های منطبق بر مرزهای محیط متخلخل درشت دانه در ارتباط مستقیم با فشار جو می باشند، لذا در هنگام شبیه‌سازی با مدل شبکه‌ای، لوله‌های اطراف شبکه، باز و در ارتباط با هوا خواهند بود (شکل ۲). با مطالعه حرکت سیال درون شبکه مزبور مشخص می‌گردد که به دلیل وجود همین لوله‌های باز و متصل به فشار جو، جریان درون برخی از لوله‌ها به صورت تحت فشار و در بعضی دیگر به صورت آزاد جریان می‌یابد. به دلیل همین ویژگی، مدل مذکور به عنوان مدل شبکه‌ای با جریان ترکیبی تحت فشار- سطح آزاد[2] نامگذاری شده است. در این نوع مدل‌سازی دو مسئله از اهمیت زیادی برخوردار است، ابتدا چگونگی آنالیز شبکه و سپس چگونگی تعیین مشخصه‌های فیزیکی و هندسی شبکه، از جمله طول و قطر لوله‌ها متناسب با شکل، اندازه و توزیع خلل و فرج موجود در محیط متخلخل.



شکل ۲- شبکه ترکیبی تحت فشار- سطح آزاد

در مدل شبکه‌ای با جریان ترکیبی به دلیل اینکه لوله‌ها در اطراف شبکه باز و در ارتباط با اتمسفر می‌باشند، امکان ایجاد فشار منفی در شبکه وجود ندارد و به محض اینکه در نقطه‌ای از جریان، فشار منفی شود، هوا وارد سیستم شده و به همین دلیل در تمامی نقاط شبکه، همیشه فشار بزرگتر یا مساوی صفر می‌باشد. با توجه به این ویژگی، آنالیز شبکه مزبور با استفاده از روشهای معمول مقدور نبوده و لذا هدف این مقاله، تدوین و ارائه روشی جهت آنالیز این نوع شبکه ترکیبی می‌باشد. در بخش بعدی جزئیات مربوط به این روش مورد بررسی قرار می‌گیرد. چگونگی تعیین مشخصه‌های فیزیکی و هندسی شبکه، از جمله طول و قطر لوله‌ها متناسب با مشخصه‌های فیزیکی و هندسی محیط متخلخل در مقاله‌های دیگر، مورد بررسی قرار گرفته است (افضلی و همکاران، ۱۳۸۷).

www.SID.ir
Archive of SID

۲- مدل شبکه ترکیبی

۲-۱- مشخصه‌های فیزیکی و هندسی مدل شبکه ترکیبی

با نگاهی دقیق به طبیعت رفتار جریان درون محیطهای متخلخل (شکل ۱)، چنین استنباط می‌شود که برای تشریح دقیق هیدرولیک جریان درون چنین محیطهایی بایستی فاکتورهای متعددی از جمله وضعیت فضای حفره‌ای بین ذرات محیط متخلخل، چگونگی ورود و خروج جریان درون این حفره‌ها و نهایتاً مجاری مختلفی که این حفره‌ها را به یکدیگر متصل می‌کنند، مدنظر قرار گیرند (Mohanty and Salter, 1982; Constantinidis and Payatakes, 1996).

در مدل شبکه ترکیبی، گره‌ها به منزله فضاهای حفره‌ای و لوله‌ها به صورت مجاری متصل به حفره‌ها عمل می‌کنند و به این ترتیب محیط متخلخل همانند شبکه‌ای از لوله‌های به هم پیوسته شبیه‌سازی می‌شود. در این مدل، افت ناشی از جمع شدگی و یا باز شدن جریان در محل حفره‌ها با احتساب ضریب افت فشار موضعی[۳] منظور می‌گردد. مدل مورد استفاده در این تحقیق به صورت شبکه‌ای واقع در صفحه قائم خواهد بود که سه طرف آن به هوای آزاد متصل می‌باشد (شکل ۲).

قطر، طول و زبری لوله و نحوه اتصال آنها چهار مشخصه فیزیکی و هندسی این مدل است که با تغییر در این مشخصه‌ها امکان شبیه سازی جریان درون محیطهای متخلخل همگن، غیرهمگن ، ریزدانه و درشت دانه میسر می‌گردد. همچنین با باز یا بسته نمودن لوله‌ها در مرزهای شبکه، وضعیت جریان در محیط متخلخل با شرایط مرزی مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد. میزان زبری لوله بر اساس نوع و شکل مصالح تعیین گشته و با تغییر تعداد و زاویه اتصال لوله‌ها در هر گره امکان تغییرشکل شبکه به گونه‌ای که به طبیعت حرکت جریان در اطراف دانه‌ها نزدیک‌تر باشد وجود دارد و همین قابلیت، علاوه براینکه تحلیل سه بعدی جریان را میسر می‌سازد، در بالا بردن دقت و کارآیی مدل بسیار موثر است.

۲-۲- هیدرولیک جریان درون شبکه ترکیبی

همانطور که قبلاً اشاره شد در شبکه ترکیبی معادل، تعدادی از مجاری در محدوده مرزهای دامنه مورد مطالعه، مستقیماً در تماس با فشار جو بوده و توسل جستن به روشهای کلاسیک تحلیل شبکه به منظور تعیین میدان‌های فشار و سرعت موضوعیت نخواهد داشت. در عین حال کماکان ترکیب معادلات پیوستگی و اندازه حرکت یا انرژی، معادلات حاکم بر جریان آب از نقطه‌ای به نقطه دیگر خواهند بود. با اندک تأملی در ویژگیهای جریان روشن خواهد گردید که گرادیان لازم به منظور انتقال سیال در داخل شبکه از نقطه‌ای به نقطه دیگر همان گرادیان هیدرولیکی یا ارتفاع معادل بلندای پیزومتریک یعنی $(p/\gamma+z)$ خواهد بود. از سوی دیگر، بلندای معادل فشار در ناحیه اشباع مثبت و بر روی سطح آزاد[۴] معادل صفر خواهد بود. تحلیل شبکه ترکیبی باید با رویکرد به ملاحظه مزبور مورد توجه قرار گیرد. به این ترتیب، به منظور شناسائی نقاط متعلق به دامنه مورد مطالعه، مقایسه مقادیر عددی کمیتهای $(p/\gamma+z)$ و z در راستای تثبیت رویه سطح آزاد ضرورت پیدا میکند. برای کلیه نقاط متعلق به ناحیه اشباع، $p/\gamma + z \rangle z$ ، برای کلیه نقاط متعلق به ناحیه موئینگی و غیر اشباع، $p/\gamma + z \langle z$ و بالاخره برای نقاط واقع بر روی سطح آزاد، $p/\gamma + z = z$ خواهد بود. روابط مزبور خود به منزله معیارهای مناسبی به منظور تثبیت سطح آزاد در داخل شبکه ترکیبی تلقی خواهند گردید. از آنجا که در مجراهایی که به هوای آزاد متصل می‌باشند در صورت ایجاد فشار منفی، هوا وارد مجرا شده و عملاً جریان وجود نخواهد داشت (Jeannine, 2001)، چنانچه در گره‌ای رابطه‌ای از نوع $p/\gamma + z \langle z$ برقرار گردد، دبی جریان در مجاری منشعب از آن گره صفر فرض گردیده و مجاری مزبور از شبکه حذف و شبکه جدید با توپولوژی اصلاح شده مجدداً تحلیل می‌گردد و روند مزبور تا تثبیت سطح آزاد میدان جریان ادامه پیدا می‌کند.

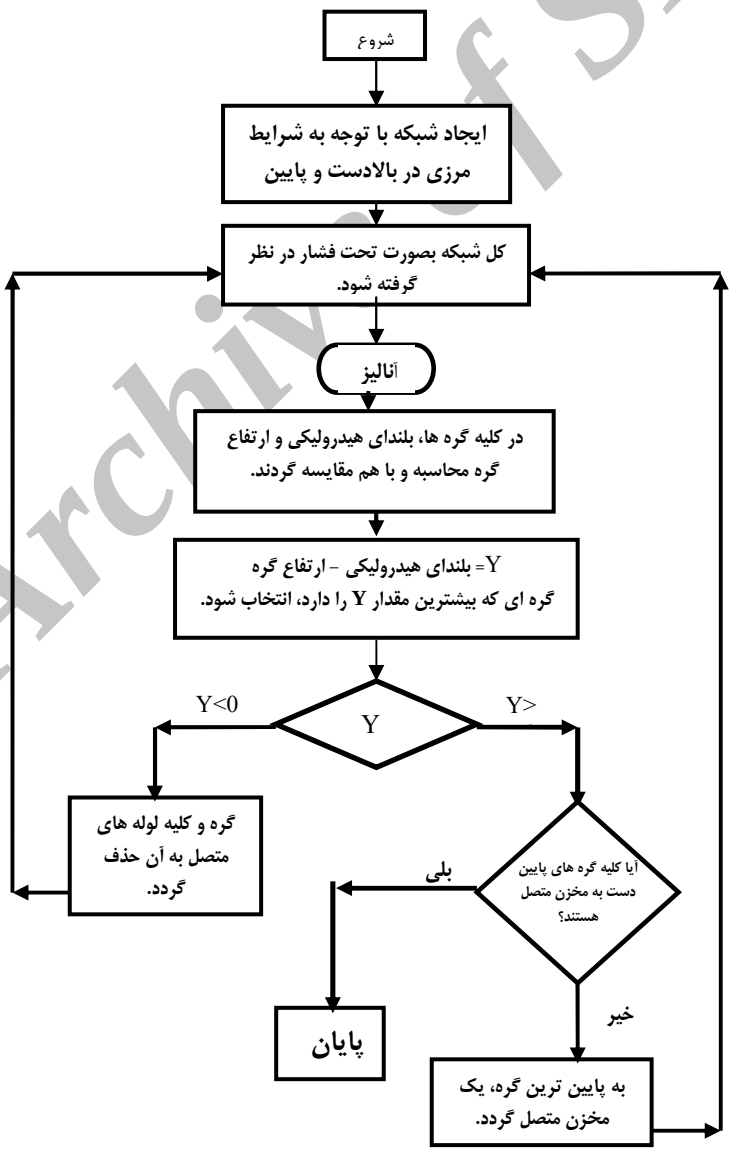
۲-۳- آنالیز شبکه ترکیبی

همانگونه که قبلاً ذکر گردید، در شبکه‌های ترکیبی بدلیل اینکه تعدادی از لوله‌های اطراف شبکه، باز و در ارتباط با فشار جو می‌باشند، لذا امکان ایجاد فشار منفی در هیچ نقطه‌ای از آن وجود ندارد. در هنگام عبور جریان، تمامی گره‌هایی که در زیر پروفیل سطح جریان هستند دارای فشار مثبت بوده و با صرف نظر از اثر موئینگی، فشار در تمامی گره‌هایی که روی پروفیل سطح آب و یا بالای آن قرار دارند، معادل فشار اتمسفر می‌باشد. به عبارتی دیگر در همه گره‌های بالای پروفیل سطح جریان، بلندای هیدرولیکی با ارتفاع گره برابر و در همه گره‌های موجود در زیر سطح جریان، بلندای هیدرولیکی از ارتفاع گره بزرگتر می‌باشد. با استفاده از همین ویژگی، آنالیز شبکه ترکیبی میسر می‌گردد. با توجه به موارد فوق تحلیل شبکه مزبور با این فرض که در آن پایاب[۵] وجود نداشته و صرفاً ارتفاع آب در بالادست کنترل کننده باشد، به صورت ذیل انجام می‌پذیرد:

Archive of SID

www.SID.ir

در قدم اول کل شبکه به صورت تحت فشار در نظر گرفته شده و با توجه به ارتفاع آب بالا دست، تعدادی مخزن با ارتفاع مشخص به بعضی از لوله‌های بالا دست شبکه متناسب با سطح آب بالادست متصل می‌گردند. در پائین دست شبکه نیز یک مخزن به پائین‌ترین گره متصل شده، بطوریکه ارتفاع آن برابر با ارتفاع همان گره باشد. در قدم بعدی این شبکه آنالیز گردیده و بلندای هیدرولیکی در کلیه گره‌های آن بدست می‌آید. در مرحله سوم، بلندای هیدرولیکی کلیه گره‌ها با ارتفاع آنها مقایسه و گره‌ای که بیشترین فشار منفی و یا بیشترین اختلاف بین بلندای هیدرولیکی و ارتفاع را داشته باشد به همراه کلیه لوله‌های متصل به آن، از شبکه حذف می‌گردد و شبکه‌ای با توپولوژی جدید ایجاد می‌گردد. این شبکه جدید دوباره آنالیز شده و تمام مراحل قبلی روی آن اعمال می گردد. این پروسه تا جایی ادامه می‌یابد که در کل شبکه، هیچ گره‌ای با فشار منفی وجود نداشته باشد. بعد از این مرحله بایستی وضعیت خروج سیال در پایین دست شبکه را مورد بررسی قرار داد. بعد از پایان یافتن تمام مراحل فوق، چنانچه در پایین دست شبکه نهایی، گره‌ای وجود داشته باشد که بالاتر از سطح مخزن بوده و حذف نشده باشد، نشان دهنده این است که در آن گره فشار مثبت وجود داشته و بلندای هیدرولیکی آن از ارتفاع گره بیشتر می‌باشد و اگر در آنجا لوله باز وجود داشت، سیال به بیرون جاری می‌گردید. لذا با اتصال یک مخزن به این گره امکان خروج سیال را میسر ساخته و شبکه‌ای با توپولوژی جدید مهیا می‌گردد. تمام عملیات فوق الذکر در خصوص این شبکه جدید تکرار شده تا جائی که در پایین دست، تمامی گره‌هایی که حذف نشده‌اند، حتماً به یک مخزن متصل شده باشند. فلوچارت مربوط به مراحل فوق در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳- فلوچارت مربوط به آنالیز شبکه ترکیبی

Archive of SID
www.SID.ir

با توجه به پروسه ذکر شده در فلوچارت شکل ۳، نرم افزاری تحت عنوان CPFN (Coupled Pressurized-Free surface Network) تهیه گردیده و شبکه‌های ترکیبی مورد استفاده در این پژوهش توسط برنامه مزبور مورد آنالیز قرار گرفته‌اند. همانگونه که بیان گردید، یکی از بخشهای اساسی در روند تحلیل شبکه‌های ترکیبی، آنالیز شبکه به صورت تحت فشار میباشد به گونه‌ای که در هر مرحله از سعی و خطا، یک شبکه جدید با توپولوژی خاص ایجاد شده و به صورت تحت فشار مورد آنالیز قرار می‌گیرد. اگرچه جهت تحلیل شبکه‌های توزیع آب که همگی به صورت تحت فشار عمل می‌کنند، روشها و برنامه‌های زیادی وجود دارد، اما در این برنامه بدلیل برخی قابلیت‌های دیگر نرم افزارEPANET، (جهت استفاده در تحقیقات بعدی)، در بخش مربوط به آنالیز شبکه‌های تحت فشار، از موتور اصلی برنامه مزبور استفاده گردیده است.

در برنامهEPANET، فرم کلی معادله افت انرژی به صورت زیر بوده و با تغییر ضرائب A و B، امکان استفاده از معادلات دارسی- وایسباخ، هیزن- ویلیامز و یا شزی- مانینگ میسر می‌گردد.

$$h_{ij} = H_i - H_j = A\left|Q_{ij}\right|^{B-1} Q_{ij} + mQ_{ij}^2 \qquad (۱)$$

در این فرمول، H_i: بلندای هیدرولیکی در گره i، h: افت بلندای هیدرولیکی، A: ضریب مقاومت، B: نمای جریان و m: ضریب افت فشار موضعی برای اتصالات مختلف شبکه می‌باشد. جدول ۱، مقادیر A و B را برای فرمول‌های مختلف در سیستم بین‌المللی SI نشان می دهد.

جدول ۱- معادله افت جریان درون لوله وقتی سیال درون لوله به صورت کاملاً پر جریان دارد.

Formula	Resistance Coefficient (A)	Flow Exponent(B)
Hazen-Williams	$10.675C_{HW}^{-1.852}d^{-4.871}l$	1.852
Darcy-Weisbach	$0.08265\, f(\varepsilon/d, R_N)d^{-5}l$	2
Chezy-Manning	$10.293n^2 d^{-5.33}l$	2

در معادلات فوق،؛ ضرائب مختلف به شرح زیر می‌باشند:

C_{HW}: ضریب زبری در معادله هیزن ویلیام (بدون واحد)، ε : ضریب زبری در معادله دارسی- وایز باخ (m)،: f ضریب اصطکاک (این ضریب به مقدار زبری نسبی و عدد رینالد بستگی دارد.)، n: ضریب زبری منینگ (بدون واحد)، d : قطر لوله (m)، l: طول لوله (m)

از آنجا که در نقاط مختلف محیط متخلخل شرایط مختلفی از نظر آشفتگی دارد، در این مدل بعد از هر بار محاسبه دبی، با توجه به سرعت جریان، عدد Re کنترل و مقدار ضریب اصطکاک متناسب با عدد رینولدز، به صورت زیر محاسبه می گردد:

۱- در صورتی که $Re>2000$ باشد از فرمول Hagen-Poiseuille (Bhave, 1991),

۲- برای $2000<Re<4000$ از معادله Dunlop (Dunlop, 1991)،

۳- برای$Re>4000$ از معادلهColebrook-White (Bhave, 1991).

همین مسئله ملحوظ نمودن وضعیت واقعی جریان اعم از آرام، مغشوش یا انتقالی را در نقاط مختلف شبکه میسر می‌سازد.

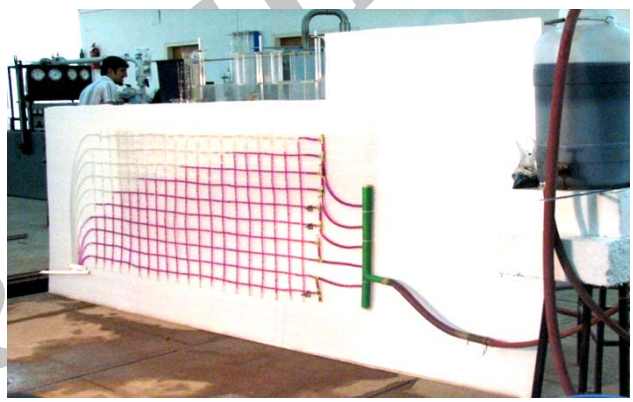
۳- معرفی مدل آزمایشگاهی

به منظور واسنجی مدل کامپیوتری[۶] تدوین شده و ارزیابی صحت[۷] آن برای وقایعی که در واسنجی مدل مورد استفاده قرار نگرفته‌اند، تهیه و ساخت مدل آزمایشگاهی در محل آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی مورد توجه قرار گرفته است. همانطور که قبلاً اشاره شد حرکت سیال در محیط متخلخل به حرکت سیال در شبکه‌ای نامتناهی و نامنظم از مجاری به هم پیوسته قابل شبیه‌سازی است. در مقیاس میکروسکوپیک، آرایش مصالح سنگی در کنار هم به منظور تحلیل هیدرولیک جریان از اهمیت خاصی برخوردار است. در این راستا، چنانچه لیوانی محتوی مصالح سنگی را به لرزش در آوریم، هر بار لرزش لیوان منجر به تولید نمونه‌ای[۸] از محیط متخلخل خواهد گردید. در عین حال در مقیاس ماکروسکوپیک، نمونه‌های مختلف رفتار میانگین نسبتاً همانندی نشان خواهند داد. مدل آزمایشگاهی مورد استفاده در این تحقیق، بر اساس یک وسیله آنالوگ چند منظوره تدوین گردیده که توسط Monadjemi (2001) به ثبت رسیده و عملکرد آن شبیه آنالوگ الکتریکی است که بجای جریان برق از جریان مایع استفاده می شود. این مدل به صورت یک شبکه ترکیبی متعامد متشکل از مجازی به هم پیوسته در صفحه قائم خواهد بود که از سه جبهه به هوای آزاد و از یک جبهه کاملاً محبوس می‌باشد. در شبکه مزبور، گره‌ها نقش حفره‌ها[۹] و لوله‌های رابط بین گره‌ها نقش مجاری رابط بین حفره‌ها[۱۰] را ایفا خواهند نمود (Wang et al., 1999).

چنانچه در محیط متخلخل واقعی سه بعدی، بعد عمود بر جریان در مقایسه با دو بعد دیگر بسیار بزرگتر باشد، فرض دو بعدی بودن جریان دور از واقعیت نمی‌باشد. شبکه پیشنهادی در صفحه قائم بمنزله نواری است که مسئله سه بعدی را به مسئله دو بعدی تقلیل می‌دهد. شبکه مذکور به طول ۱۴۲/۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۶۷/۵ سانتی‌متر با استفاده از لوله و اتصالات شیشه‌ای با قطر داخلی ۳/۵

Archive of SID
www.SID.ir

میلی‌متر تهیه گردیده است. در این شبکه تعداد گره‌ها ۲۰×۱۰ عدد و طول هر لوله ۷/۵ سانتی‌متر می‌باشند. شکل ۴ نمایی از شبکه ساخته شده در محل آزمایشگاه را نشان می‌دهد. بدیهی است با اعمال شرایط مرزی مختلف و تحریک مدل آزمایشگاهی، امکان بررسی رفتار هیدرولیکی مدل فیزیکی برای شرایط مرزی مختلف میسر خواهد بود. به منظور واسنجی مدل کامپیوتری و صحت سنجی اعتبار آن، در مجموع ۲۹ فقره آزمایش ترتیب داده شده است که در این میان از۲۰ فقره آزمایش برای واسنجی مدل کامپیوتری و از ۹ فقره آزمایش برای اعتبار سنجی مدل بهره گیری موثری بعمل آمده است. در کلیه آزمایشها گذر حجمی خروج آب از شبکه و همچنین پروفیل سطح آب بعنوان متغیرهای حالت مورد پایش قرار گرفته است.



شکل ۴- شبکه شیشه‌ای ترکیبی

۴- واسنجی مدل کامپیوتری و ارزیابی صحت اعتبار آن

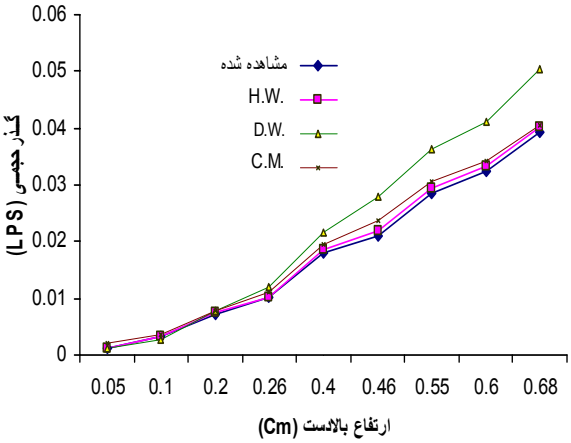
همانطور که قبلاً اشاره شد به منظور نقد و ارزیابی فرضیات بکار رفته در تبیین مدل کامپیوتری، مبادرت به تهیه و ساخت مدل آزمایشگاهی و تحریک آن برای مقادیر مختلف بلندای آب در بالا دست گردید. با رویداشت به این مطلب که تقریباً کلیه مدل‌های کامپیوتری نیازمند فرایند واسنجی به تناسب درجات آزادی بکار رفته در آنها می‌باشند، پارامتر زبری مجاری بعنوان پارامتر واسنجی انتخاب و با بهره‌گیری از تعدادی آزمایشات طراحی شده مبادرت به تنظیم پارامتر زبری به منظور شبیه‌سازی گذر حجمی خروجی و پروفیل سطح آب گردید. فرایند واسنجی در تحقیق حاضر به گونه‌ای دستی (Manual calibration) و با تغییر تدریجی مقادیر زبری به منظور تحصیل انطباقی مناسب بین مقادیر محاسبه شده و مشاهده شده انجام گردیده است. از آنجا که در مدل کامپیوتری EPANET که با اعمال تغییراتی مورد استفاده این تحقیق قرار گرفته ، محاسبه افت فشار با رویداشت به سه معادله کاملاً متمایز انجام می‌پذیرد، فرایند واسنجی برای معادلات دارسی- وایسباخ (ε)، هیزن- ویلیام (C_{HW}) و شزی- منینگ (n) به گونه‌ای جداگانه مورد توجه قرار گرفته و پارامترهای مقاومت برای تحصیل بهترین انطباق میان مقادیر محاسبه شده و مشاهده شده به ترتیب معادل $\varepsilon = 0.045mm$ ، $C_{HW} = 117$ و $n = 0.008$ بدست آمده است.

تجارب ناشی از فرایند واسنجی دلالت بر این دارد که پارامتر مقاومت بکار رفته در معادله‌های هیزن- ویلیام و شزی- منینگ از بیشترین پایداری و پارامتر مقاومت بکار رفته در معادله دارسی- وایسباخ از کمترین پایداری و بیشترین تغییرات برای آزمایشات مختلف برخوردار بوده است. پس از انجام فرایند واسنجی، پارامترها در مقادیر بهینه خود تثبیت و ارزیابی صحت اعتبار مدل و نقد و بررسی فرضیات بکار رفته در مدل کامپیوتری مورد توجه قرار گرفته است. در این راستا، مدل آزمایشگاهی و نرم افزاری برای مقادیر مختلف ارتفاع آب در بالا دست تحریک و گذر حجمی خروجی و پروفیل سطح آب در مدل آزمایشگاهی مشاهده و در مدل کامپیوتری محاسبه گردیده است. در شکل (۵) مقادیر گذر حجمی محاسبه شده و مشاهده شده بر حسب مقادیر ارتفاع بالا دست برای معادلات مقاومت مختلف به گونه‌ای مقایسه‌ای آورده شده است. همانطور که نمودار ترسیمی فوق نشان می‌دهد، نتایج حاصل از شبیه سازی با بهره گیری از معادلات مقاومت هیزن- ویلیام و شزی- مانینگ تطابق قابل توجه‌ای با مقادیر مشاهده‌ای نشان می‌دهد. این در شرایطی است که نتایج حاصل از شبیه‌سازی با بهره گیری از معادله دارسی- وایسباخ کمترین انطباق را با مقادیر مشاهده‌ای از خود نشان می‌دهد. به منظور بررسی دقیق تر صحت اعتبار مدل، در شکل (۶) مقادیر گذرحجمی محاسبه شده بر حسب مقادیر گذر حجمی مشاهده شده نظیر برای معادله مقاومت هیزن- ویلیام نمایش داده شده است. ضریب تعیین $R^2 = 0.99$ دلالت برهمبستگی نسبتاً مناسب مقادیر محاسبه شده و مشاهده شده داشته و حاکی از آنست که مدل نرم افزاری تبیین شده قادر به توصیف ۹۹ درصد از تغییرات حادث در مقادیر مشاهداتی آزمایشگاهی می‌باشد.

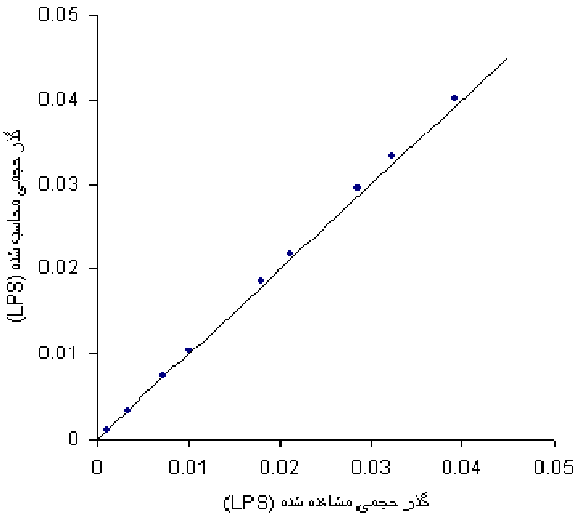
در سالهای اخیر ارزیابی صحت اعتبار مدل نرم افزاری با رویداشت به انطباق نسبی گذر حجمی در پائین دست بشدت مورد انتقاد قرار گرفته است (Beven, 1993; 2000). مدافعین این طرز تفکر بر این باورند که تحصیل انطباق مناسب در متغیر حالت در نقطه خروجی عمدتاً مبتنی بر مفاهیم ریاضی است و الزاماً شاخصهای برازندگی مناسب بمنزله شبیه‌سازی فرایند مبتنی بر فیزیک نمی‌باشد و لذا بحث صحت‌سنجی داخلی مدل[11] را بعنوان شاخصی مناسب برای

www.SID.ir
Archive of SID

ارزیابی مدل در مرحله صحت سنجی پیشنهاد نموده‌اند. در این راستا با پایش عمق جریان آب در نقاط مختلف در مدل آزمایشگاهی و مدل نرم افزاری مبادرت به بررسی اعتبار مدل تبیینی گردید.

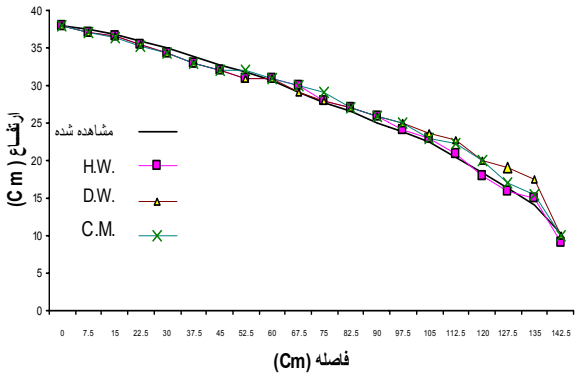


شکل ۵- گذر حجمی مشاهده شده و محاسبه شده برای معادلات مختلف مقاومت

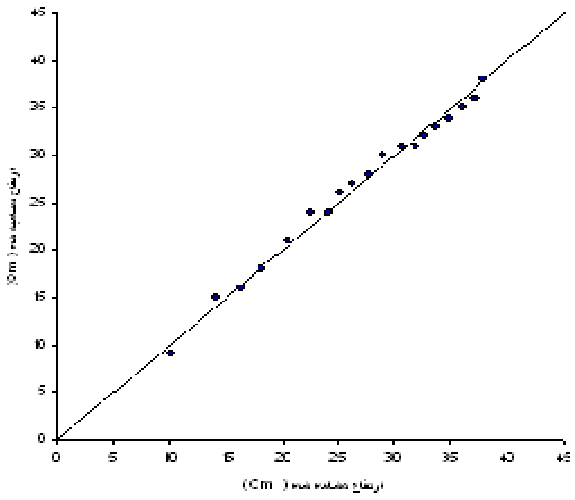


شکل ۶- گذر حجمی محاسبه شده بر حسب مقادیر مشاهده شده (هیزن ویلیام)

شکل (۷) پروفیل عمق آب مشاهداتی و محاسباتی را بر حسب فاصله در داخل شبکه برای فرمول‌های مقاومت مختلف نشان می‌دهد. همانطور که از نمایش ترسیمی مزبور استنباط می‌شود، نتایج حاصل از شبیه سازی به طرز ناباورانه‌ای روند مشاهداتی را تعقیب نموده و تنها در محدوده‌ای که گرادیان هیدرولیکی نسبتاً قابل ملاحظه می‌باشد اختلافاتی بین مقادیر مشاهده و محاسبه شده ملاحظه می‌گردد. به منظور بررسی دقیق‌تر صحت اعتبار مدل، در شکل (۸) مقادیر عمق جریان محاسبه شده بر حسب مقادیر عمق جریان مشاهده شده نظیر برای معادله مقاومت هیزن-ویلیام نمایش داده شده است. در اینجا نیز، ضریب تعیین $R^2 = 0.99$ دلالت بر همبستگی نسبتاً مناسب مقادیر محاسبه شده و مشاهده شده داشته و حاکی از آنست که مدل نرم افزاری تبیین شده در مرحله صحت سنجی داخلی نیز قادر به توصیف ۹۹ درصد از تغییرات حادث در مقادیر مشاهداتی آزمایشگاهی می‌باشد.



شکل ۷- پروفیل عمق آب بر حسب فاصله برای معادلات مختلف مقاومت



شکل ۸- مقادیر عمق آب محاسبه شده بر حسب مقادیر مشاهده شده (هیزن ویلیام)

۵- جمع بندی و نتیجه گیری

به لحاظ اهمیت جریان سیال در محیط متخلخل و کاربردهای متعدد و متنوع آن در شاخه‌های مختلف علوم مهندسی، تحقیق حاضر با

www.SID.ir

هدف شبیه‌سازی جریان آب در محیط متخلخل با بهره‌گیری از شبکه ترکیبی (تحت فشار سطح آزاد) و با استفاده از مجاری لوله‌ای به هم پیوسته مورد توجه قرار گرفته است. از آنجا که در مدل شبکه‌ای با جریان ترکیبی، لوله‌ها در اطراف شبکه باز و در ارتباط با اتمسفر می‌باشند، لذا آنالیز شبکه مزبور با استفاده از روشهای معمول مقدور نمی‌باشد. در این مقاله، روشی جهت آنالیز این نوع شبکه ترکیبی تدوین و ارائه گردیده و با تهیه و ساخت مدل آزمایشگاهی و تحریک و پایش مقادیر گذر حجمی و پروفیل سطح آب و مقایسه نتایج مشاهده شده در آزمایشگاه با نتایج حاصل از اجرای برنامه رایانه‌ای مبتنی بر روش پیشنهادی، صحت مدل مورد بررسی قرار گرفته است. با تقسیم بانک اطلاعاتی جمع آوری شده به داده‌های واسنجی[12] و داده‌های اعتبارسنجی[13] امکان کالیبراسیون مدل نرم افزاری، ارزیابی اعتبار مدل و... میسر گردیده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نرم‌افزاری دلالت بر انطباق نسبتاً مناسب مقادیر مشاهداتی و محاسباتی گذر حجمی خروجی و عمق آب در نقاط مختلف شبکه داشته و نهایتاً صحت روش پیشنهادی را مورد تایید قرار می‌دهد. تبدیل محیط متخلخل واقعی به شبکه‌ای ترکیبی از مجاری به هم پیوسته و مدل‌سازی نرم افزاری محیط متخلخل برای شرایط مختلف با رویکرد جدید فوق در مقاله‌های بعدی بیان می گردد.

پی‌نوشت‌ها

1- Unconfined Coarse Rockfill Media
2- A Coupled Pressurized-free Surface Network
3- Minor Loss
4- Water Table
5- Tail Water
6- Model Calibration
7- Model Validation
8- Realization
9- Pore Body
10- Pore throat
11- Internal Validation
12- Calibration Set
13- Validation Set

۶- مراجع

افضلی، س. ح.، عابدینی، م. ج. و منجمی، پ. (۱۳۸۷)، "تعیین ویژگی‌های فیزیکی شبکه معادل در تحلیل جریان درون محیط‌های متخلخل با استفاده از مدل‌های شبکه‌ای، *مجله علمی و پژوهشی آب و فاضلاب*، شماره ۶۸، صفحه ۴۸-۵۶.

Acharya, R. C., Zee, S. E. A. T. M. and Leijnse, A. (2004), "Porosity-permeability properties generated with a new 2-parameter 3D hydraulic pore-network model for consolidated and unconsolidated porous media", *Adv. Water Recour.* 27: pp. 707-723.

Al-Raoush, R., Thompson, K. and Wilson C. S. (2003), "Comparison of network generation techniques for unconsolidated porous media", *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67: pp. 1678-1700.

Beven, K. J. (1993), "Prophecy, reality and uncertainty in distributed hydrological modeling", *Adv. Water Resour.* 16: pp. 41-51.

Beven, K .J. (2000), "Uniqueness of place and process representations in hydrological modeling", *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 4(2): pp. 203-213.

Bhave, P.R. (1991), *Analysis of Flow in Water Distribution Networks*. Technomic Publishing. Lancaster, PA.

Constantinidis, G. N. and Payatakes, A. C. (1996), "Network simulation of steady-state two-phase flow in consolidated porous media", *AICHE J. 42*: pp. 369-379.

Dunlop, E.J. (1991), *WADI Users Manual*. Local Government Computer Services Board, Dublin, Ireland.

Fischer, U. and Celia, M. A. (1999), "Prediction of relative and absolute permeabilities for gas and water from soil water retention curves using a pore-scale network model", *Water Resour. Res.* 35(4): pp. 1089- 1100.

Held, R. J. and Celia, M. A. (2001a), " Modeling support of functional relationships between capillary pressure, saturation, interfacial area and common lines", *Adv. Water Resour.* 24: pp. 325-343.

Held, R. J. and Celia, M. A. (2001b), "Pore-scale modeling extension of constitutive relationships in the range of residual saturations", *Water Resour. Res.* 37(1): pp. 165-170.

Herrera, N. M. and Felton, G. K. (1991), "Hydraulics of flow through a rockfill dam using sediment-free water", *Trans. ASAE.* 34(3): pp. 871– 875.

Hosseini, S. M. (1997), *Development of an unsteady nonlinear model for flow through coarse porous media*, School of Eng., PhD. Thesis, The University of Guelph, Guelph, Canada. 562 p.

Jeannine, P. (2001), "Modeling flow in phreatic and epiphreatic karst conduits in the Holloch cave" (Muotatal, Switzerland), *Water Resour. Res.* 37(2): pp. 191-200.

Archive of SID
www.SID.ir

Stephenson, D. (1979), *Rockfill in hydraulic engineering*, Elsevier Scientific, New York. 230p.

Thauvin, F. and Mohanty, K. K. (1998), "Network modeling of non-Darcy flow through porous media", *Transport porous med.* 31: pp. 19-37.

Wang, X., Thauvin, F. and Mohanty, K. K. (1999), "Non-Darcy flow through porous media", *Chem. Eng. Sci.* 54: pp. 1859-1869.

Ward, J. C. (1964), "Turbulent flow in porous media", *J. Hydraul. Eng, ASCE.* 92(4): pp. 1–12.

Li, B., Garga, V. K. and Davies, M. H. (1998), "Relationship for non-Darcy flow in rockfill", *J. Hydraul. Eng. ASCE.* 124(2): pp. 206-212.

Mohanty, K. K. and Salter, S. J. (1982), "Multiphase flow in porous media": II. Pore-level modeling, SPE 11-18. *Proceedings of the Annual Fall Technical Conference of the SPE-AIME*, September 26-29, New Orleans.

Monadjemi, P. (2001), "Multipurpose fluid analog computer". United State Patent Office, No. 6223140.

Archive of SID

www.SID.ir