



Proceedings

11th
Iranian

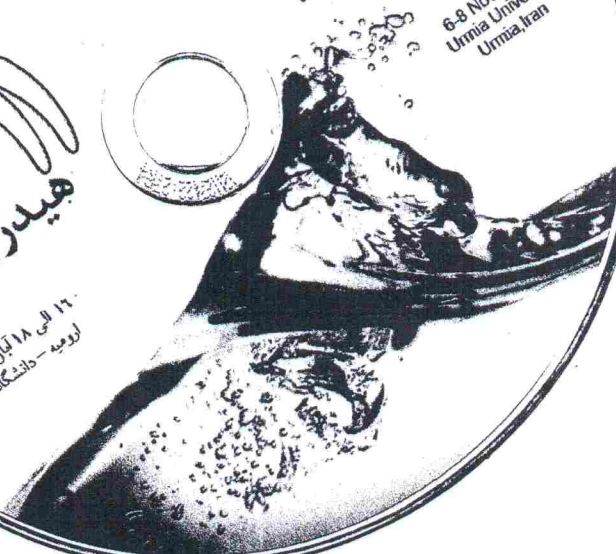
Hydraulic
Conference

6-8 Nov. 2012
Urmia University
Urmia, Iran



مجموعه مقالات
یازدهمین کنفرانس
هیدرولیک ایران

۱۶ الی ۱۸ آبان ماه ۱۳۹۱
ارومیه - دانشگاه ارومیه



تجزیه و تحلیل عدم قطعیت معادلات جریان در محیط متخلخل درشت‌دانه با استفاده از روش احتمالاتی فازی

علی یوسفی^۱، سید محمود حسینی^۲

۱- دانشجوی دکترای مهندسی هیدرولیک دانشگاه فردوسی مشهد

۲- استاد گروه مهندسی عمران دانشگاه فردوسی مشهد

ali.yousefi@stu-um.ac.ir

خلاصه

در معادلات جریان در محیط متخلخل درشت‌دانه، برخی از پارامترهای فیزیکی به صورت دقیق قابل اندازه‌گیری نمی‌باشند و دارای عدم قطعیت هستند. با استفاده از تجزیه و تحلیل عدم قطعیت می‌توان عدم قطعیت در خروجی مدل را که ناشی از عدم قطعیت در پارامترهای ورودی می‌باشد، محاسبه کرد. در این تحقیق در بررسی معادلات جریان در محیط متخلخل درشت‌دانه، از روش آماری تخمین مرتبه اول برای تجزیه و تحلیل عدم قطعیت معادلات Wilkins و Adel و همچنین، از روش ترکیبی که یک روش احتمالاتی فازی می‌باشد، برای معادلات Stephenson و Wilkins استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهند که عدم قطعیت معادلات Stephenson و Wilkins با استفاده از روش ترکیبی، که ماهیت واقعی پارامترها را بهتر شناسایی می‌کند، بیشتر از عدم قطعیت حاصل از روش آماری تخمین مرتبه اول می‌باشد. از مقایسه نتایج سه معادله مذکور نیز مشخص می‌شود که معادله Adel کمترین عدم قطعیت را دارا می‌باشد.

کلمات کلیدی: تجزیه و تحلیل عدم قطعیت، محیط متخلخل درشت‌دانه، روش احتمالاتی فازی، روش تخمین مرتبه اول.

۱- مقدمه

همانطور که نمی‌توان از عدم قطعیت‌های موجود در زندگی دوری جست، در پروژه‌های مهندسی نیز نمی‌توان از عدم قطعیت‌ها صرف‌نظر کرد. عدم قطعیت خروجی یک مدل ریاضی به دلیل عدم قطعیت در ساختار ریاضی یک مدل و یا به دلیل عدم قطعیت موجود در پارامترهای ورودی به آن مدل می‌باشد. هدف از تجزیه و تحلیل عدم قطعیت ناشی از پارامترهای ورودی، تعیین عدم قطعیت خروجی مدل با اعمال عدم قطعیت پارامترهای ورودی به آن مدل می‌باشد. تجزیه و تحلیل عدم قطعیت یک چهارچوب منظم و سیستماتیک برای کمی کردن عدم قطعیت‌های خروجی یک مدل تهیه می‌کند و با استفاده از آن می‌توان تأثیر پارامترهای ورودی را بر عدم قطعیت کلی خروجی مدل تعیین کرد [۱].

برای تجزیه و تحلیل عدم قطعیت، روش‌های مختلفی وجود دارد که به نوع عدم قطعیت پارامترهای ورودی بستگی دارد. عدم قطعیت پارامترها را می‌توان به دو گروه کلی عدم قطعیت تصادفی و عدم قطعیت غیر تصادفی تقسیم کرد. در عدم قطعیت تصادفی، خصوصیات آماری پارامتر مورد نظر با استفاده از نمونه‌برداری متعدد محاسبه شده و از روش‌های آماری برای تجزیه و تحلیل عدم قطعیت استفاده می‌شود [۲]. روش‌های آماری در بسیاری از مسایل هیدرولیکی مورد استفاده قرار گرفته‌اند که در ادامه به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود. در زمینه تجزیه و تحلیل عدم قطعیت سیستم‌های توزیع آب می‌توان به کارهای Kang و Lansney در سال ۲۰۰۸ [۳]، Kang و همکاران در سال ۲۰۰۹ [۴] و Jankovic و همکاران در سال ۲۰۰۰ [۵] اشاره کرد. همچنین، در زمینه تجزیه و تحلیل عدم قطعیت مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی می‌توان به کارهای Crystal و همکاران در سال ۲۰۱۰ [۶]، Ye و همکاران در سال ۲۰۰۹ [۷] و Kunstmann و همکاران در سال ۲۰۰۲ [۸] اشاره کرد. در این تحقیق‌ها، از روش‌های آماری شبیه‌سازی مونت کارلو، شبیه‌سازی مونت کارلو با نمونه‌گیری مربع لاتین و تخمین مرتبه اول برای تجزیه و تحلیل عدم قطعیت مدل استفاده شده است.

عدم قطعیت غیر تصادفی، به دلیل کمبود اطلاعات، مبهم بودن اطلاعات، استفاده از عبارات کلامی به جای اعداد یا کسب اطلاعات بر اساس نظر افراد با تجربه ایجاد می‌شود [۲]. در این گونه مسایل از روش‌های حساب فازی برای تجزیه و تحلیل عدم قطعیت استفاده می‌شود که بر پایه تئوری فازی بنا شده‌اند و پارامترهای ورودی توسط متغیرهای فازی بیان می‌شوند. این روش‌ها نیز در مسایل هیدرولیکی کاربرد دارند که چند نمونه از آن‌ها در ادامه ذکر می‌شوند. Ridolfi و Revelli در سال ۲۰۰۲ [۹]، Branislavljevic و Ivetic در سال ۲۰۰۶ [۱۰] و Gupta و Bhave در سال ۲۰۰۷ [۱۱] به تجزیه

و تحلیل عدم قطعیت سیستم‌های توزیع آب با استفاده از روش حساب فازی پرداخته‌اند. همچنین، Abebe و همکاران در سال ۲۰۰۰ [۱۲] و Kumar و Schuhmacher در سال ۲۰۰۵ [۱۳] به تجزیه و تحلیل عدم قطعیت آلودگی آب زیرزمینی پرداخته‌اند. در زمینه تجزیه و تحلیل عدم قطعیت آلودگی جریان در رودخانه‌ها می‌توان به کارهای Ganoulis در سال ۲۰۰۶ [۱۴] و Mpimpas و همکاران در سال ۲۰۰۸ [۱۵] اشاره کرد.

در برخی از مسایل، ترکیبی از پارامترهای تصادفی و غیرتصادفی وجود دارد که برای تجزیه و تحلیل عدم قطعیت این گونه مسایل از روش ترکیبی که یک روش احتمالاتی فازی است، استفاده می‌شود. در این روش، روش حساب فازی و یکی از روش‌های آماری به صورت ترکیبی مورد استفاده قرار می‌گیرند. گرچه سابقه استفاده از این روش به گستردگی روش‌های قبلی نیست ولی در ادامه به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود. Zhang و همکاران در سال ۲۰۰۹ [۱۶] به تجزیه و تحلیل عدم قطعیت انتقال آلاینده در جریان آب زیرزمینی پرداخته‌اند و از روش‌های مختلف احتمالاتی فازی شامل روش تبدیل و روش ترکیبی، استفاده شده است. Faybishenko در سال ۲۰۱۰ [۱۷] عدم قطعیت موجود در معادله بیلان آب را مورد بررسی قرار داد و برای این منظور برخی از پارامترها را به صورت فازی و برخی را به صورت آماری در نظر گرفت و از روش ترکیبی برای تجزیه و تحلیل عدم قطعیت استفاده کرد. Li و Zhang در سال ۲۰۱۰ [۱۸] جریان آب زیرزمینی را با پارامترهای غیردقیق مدل کردند که برای این منظور از یک روش احتمالاتی فازی (روش تبدیل) استفاده شده است.

در تحقیق حاضر، برای بررسی معادلات جریان در محیط متخلخل درشت‌دانه، از روش ترکیبی به عنوان یک روش احتمالاتی فازی برای تجزیه و تحلیل عدم قطعیت دو معادله Stephenson و Wilkins و همچنین، از روش تخمین مرتبه اول به عنوان یک روش آماری برای معادله Adel استفاده شده است. برای این منظور از داده‌های آزمایشگاهی تحقیق حسینی و جهانگیری در سال ۱۳۹۰ [۱۹] استفاده شده که در آن، تمام پارامترها به صورت تصادفی در نظر گرفته شده‌اند و روش تخمین مرتبه اول برای تجزیه و تحلیل عدم قطعیت توصیه و مورد استفاده قرار گرفته است. در تحقیق حاضر، پارامترها بر اساس ماهیت واقعی آن‌ها تعریف شده و نتایج حاصل از روش احتمالاتی فازی برای دو معادله Stephenson و Wilkins و نتایج حاصل از روش آماری برای معادله Adel با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همچنین نتایج حاصل از تحقیق حاضر با نتایج حاصل از تحقیق حسینی و جهانگیری مقایسه شده است.

۲- مواد و روش‌ها

در این بخش، ابتدا به بررسی مختصر معادلات جریان در محیط متخلخل درشت‌دانه پرداخته می‌شود. سپس، روش‌های تجزیه و تحلیل عدم قطعیت شامل روش حساب فازی (به همراه مفاهیمی از تئوری فازی)، روش تخمین مرتبه اول (به عنوان یک روش آماری) و روش ترکیبی معرفی و مورد بررسی قرار می‌گیرند. در انتها، در مورد اطلاعات آزمایشگاهی و روش تولید داده‌های ورودی فازی از روی نظرات کارشناسان توضیح داده می‌شود. داده‌های ورودی فازی در روش ترکیبی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۲-۱- معادلات جریان در محیط متخلخل درشت‌دانه

شبه‌سازی جریان در محیط‌های متخلخل، در شاخه‌های مختلف مهندسی از قبیل مهندسی زمین‌شناسی، مهندسی منابع آب، مهندسی شیمی، مهندسی نفت و مهندسی عمران کاربرد فراوانی دارد. از کاربردهای آن در مسائل هیدرولیکی می‌توان بررسی جریان درون سدهای سنگریزه‌ای، بندهای انحرافی سنگریزه‌ای، موج‌شکن‌ها، فیلترهای شنی و گابیون‌ها را نام برد [۲۰]. یک ویژگی سازه‌های سنگریزه‌ای این است که جریان در محیط متخلخل از قانون خطی داری پیروی نمی‌کند و معادله جریان غیرداری که غیرخطی می‌باشد، بر آن حکم فرما است. یک روش رایج برای محاسبه پارامترهای هیدرولیکی استفاده از روابط تجربی است که خواص فیزیکی و هندسی محیط را در ساختار خود دارند. در ادامه سه معادله تجربی که پیش‌بینی بهتری از جریان در محیط متخلخل انجام می‌دهند و از مقبولیت بیشتری در کاربرد عملی برخوردارند و در این تحقیق استفاده شده‌اند، مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۱- معادله Stephenson:

$$i = \frac{800v}{\text{gnd}^2} V + \frac{K_t}{n^2 \text{gd}} V^2 \quad (1)$$

۲- معادله Wilkins:

$$i = \frac{1}{m^{0.93}} \left(\frac{V}{Wn} \right)^{1.85} \quad (2)$$

۳- معادله Adel:

$$i = \frac{160v(1-n)^2}{\text{gn}^3 d_{15}^2} V + \frac{2.2}{\text{gn}^2 d_{15}} V^2 \quad (3)$$

که در روابط (۱)، (۲) و (۳)، i گرادیان هیدرولیکی، V سرعت داری، n تخلخل، ν لزجت جنبشی سیال، g شتاب جاذبه زمین، d اندازه میانگین هارمونیک مصالح، K_t فاکتور اصطکاک در ناحیه جریان آشفته، W مقدار ثابتی که در دستگاه بین المللی آحاد (SI) برابر $5/243$ است، d_{15} اندازه مصالح که ۱۵ درصد مصالح از نظر وزنی از آن ریزتر هستند، می‌باشند. پارامتر کلیدی در رابطه ویلکینز m می‌باشد که توسط رابطه زیر به دست می‌آید:

$$m = \frac{ed}{6r_e} \quad (4)$$

که در آن، e نسبت تخلخل، r_e راندمان نسبی سطح ذرات می‌باشد که انحراف شکل و سطح یک ذره را از یک ذره کروی صاف مشخص می‌کند. این پارامتر برای کره صاف برابر ۱، برای سنگ آهک شکسته تقریباً برابر $1/6$ و تا حدود ۲ برای سنگ‌های شکسته می‌تواند در نظر گرفته شود. همچنین، K_t نیز به انحراف شکل یک ذره از یک ذره کروی صاف بستگی دارد به نحوی که برای کره صاف ۱ و برای سنگ‌های شکسته و گوشه‌دار ۴ توصیه شده است [۲۱].

همانطور که در روابط مذکور مشاهده می‌شود، پارامترهای متعددی در معادلات جریان در محیط متخلخل درشت‌دانه مورد استفاده قرار می‌گیرند. برخی از این پارامترها در معرض عدم قطعیت بوده و به صورت دقیق قابل اندازه‌گیری نمی‌باشند. از پارامترهای دارای عدم قطعیت، می‌توان به پارامترهای d ، n ، K_t ، r_e و d_{15} اشاره کرد. اگر به ماهیت این پارامترها دقت شود، پارامترهایی چون d ، n و d_{15} که با اندازه‌گیری‌های مکرر می‌توان به مقادیر واقعی آن‌ها نزدیک شد، از ماهیت تصادفی برخوردار هستند ولی پارامترهای K_t و r_e که راه عملی برآورد آن‌ها استفاده از نظر کارشناسان خیره می‌باشد، از یک ماهیت غیر تصادفی برخوردار می‌باشند که عملاً اهمیت مطالعه حاضر در استفاده از روش ترکیبی را کاملاً برجسته می‌کند. باید توجه داشت که در معادلات مذکور سرعت به عنوان یک پارامتر قطعی در نظر گرفته می‌شود. لازم به توضیح است که با در نظر گرفتن عدم قطعیت برای پارامترهای ورودی هر یک از معادلات جریان، خروجی معادله که گرادیان هیدرولیکی می‌باشد، در معرض عدم قطعیت قرار می‌گیرد که با استفاده از روش‌های تجزیه و تحلیل عدم قطعیت، عدم قطعیت خروجی معادله محاسبه می‌شود.

۲-۲- روش‌های تجزیه و تحلیل عدم قطعیت

در این بخش، ابتدا روش تخمین مرتبه اول (به عنوان یک روش آماری) که در تحقیق حسینی و جهانگیری [۱۹] مورد استفاده قرار گرفته، بررسی می‌شود. سپس، روش حساب فازی که در روش ترکیبی مورد استفاده قرار گرفته، توضیح داده می‌شود. در انتها نیز روش ترکیبی که در تحقیق حاضر به مسئله اعمال شده است، بیان می‌شود.

۲-۲-۲- روش تخمین مرتبه اول

در تحقیق حسینی و جهانگیری از روش تخمین مرتبه اول برای تجزیه و تحلیل عدم قطعیت استفاده شده است. در این روش، میزان عدم قطعیت خروجی یک مدل بر اساس ویژگی‌های آماری پارامترهای تصادفی مدل تخمین زده می‌شود. نظریه‌ی اصلی این روش، تقریب مدل دارای پارامترهای تصادفی با استفاده از بسط سری تیلور می‌باشد. فرض کنید که کمیت هیدرولیکی یا هیدرولوژیکی W به N متغیر تصادفی به شکل رابطه زیر مرتبط باشد:

$$W = g(X) = g(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (5)$$

که در آن، $X = (X_1, X_2, \dots, X_N)^T$ ، یک بردار ستونی N بعدی از پارامترهای مدل است به طوری که تمام X ها در معرض عدم قطعیت می‌باشند. بالانویس t نشان دهنده‌ی ترانهاده ماتریس یا بردار است. در رابطه (۵)، W می‌تواند i یعنی گرادیان هیدرولیکی در هر یک از معادلات جریان در محیط متخلخل درشت‌دانه و پارامترهای X_1, X_2, \dots, X_N می‌توانند پارامترهای فیزیکی ورودی به مسئله باشند. بسط سری تیلور مرتبه اول تابع $g(X)$ نسبت به نقطه $X = x_0$ در فضای پارامتری به صورت رابطه زیر بیان می‌شود:

$$W \approx g(x_0) + s_0^t \cdot (X - x_0) \quad (6)$$

که در آن، s_0 بردار ستونی از ضریب حساسیت است که هر المان آن به صورت $\frac{\partial W}{\partial x_i}$ نشان داده می‌شود و در نقطه $X = x_0$ محاسبه می‌شود. میانگین و واریانس W با استفاده از روش تخمین مرتبه اول به صورت روابط زیر بیان می‌شوند:

$$E[W] \approx g(x_0) + s_0^t \cdot (\mu - x_0) \quad (7)$$

$$\text{Var}[W] = s_0^t C s_0 \quad (8)$$

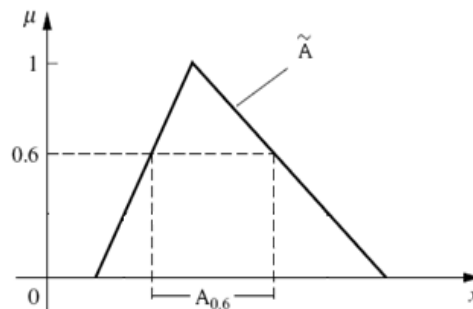
که در روابط (۹) و (۱۰)، μ و C به ترتیب بردار میانگین‌ها و ماتریس کوواریانس پارامترهای تصادفی X می‌باشند. معمولاً در روش تخمین مرتبه اول نقطه بسط $x_0 = \mu$ در نظر گرفته می‌شود. در عمل دو گشتاور اول در تحلیل عدم قطعیت مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲۲].

۲-۲-۱- روش حساب فازی

تئوری فازی به وسیله پروفیسور لطفی زاده در سال ۱۹۶۵ معرفی گردید [۲۳]. تئوری فازی دارای زیرمجموعه‌هایی مانند منطق فازی و استدلال تقریبی، مدل‌سازی فازی و شناخت الگوی فازی، کنترل فازی، و حساب فازی می‌باشد. از حساب فازی برای اعمال عدم قطعیت در معادلات حاکم بر پدیده‌های مختلف استفاده می‌شود [۲۴]. در روش‌های حساب فازی، پارامترهای ورودی دارای عدم قطعیت توسط اعداد فازی بیان می‌شوند که این اعداد به وسیله توابع عضویت تعریف می‌شوند. یک تابع عضویت، میزان درجه عضویت المان‌های مختلف را به یک مجموعه نشان می‌دهد. اعداد فازی انواع مختلفی دارند که عدد فازی مثلثی پرکاربردترین آن‌ها می‌باشد. برش α در اعداد فازی، یکی از مفاهیمی است که در روش‌های حساب فازی کاربرد فراوانی دارد. مجموعه برش α (A_α) در عدد فازی \tilde{A} توسط رابطه زیر تعریف می‌شود [۲۴]:

$$A_\alpha = \{x \mid \mu_{\tilde{A}}(x) \geq \alpha\} \quad (9)$$

که در آن $\mu_{\tilde{A}}(x)$ میزان درجه عضویت x به عدد فازی \tilde{A} می‌باشد. در شکل ۱، یک عدد فازی مثلثی به همراه برش 0.6 آن نشان داده شده است.



شکل ۱- عدد فازی مثلثی \tilde{A} و برش 0.6 آن

برای اعمال پارامترهای فازی ورودی به مدل و به دست آوردن عدم قطعیت خروجی مدل به صورت اعداد فازی، از روش‌های حساب فازی استفاده می‌شود. در روش‌های حساب فازی برای هر برش از عدد فازی ورودی، تحلیل صورت می‌گیرد و مقادیر ماکزیمم و مینیمم خروجی مدل محاسبه می‌شود و با تجمیع نتایج برش‌های مختلف، عدد فازی خروجی به دست می‌آید. سپس، با استفاده از رابطه بین مفهوم برش α در اعداد فازی و فاصله اطمینان در توابع توزیع، عدم قطعیت خروجی محاسبه می‌شود. روش‌های حساب فازی عبارتند از: ۱- اصل توسعه، ۲- روش‌های تقریبی توسعه و ۳- روش بهینه‌سازی مقید. روش اصل توسعه برای متغیرهای ورودی گسسته مورد استفاده قرار می‌گیرد درحالی‌که دو روش دیگر برای متغیرهای ورودی پیوسته کاربرد دارند. روش‌های تقریبی توسعه برای مدل‌هایی که پیچیده نیستند و به دست آوردن مقادیر ماکزیمم و مینیمم خروجی مدل در هر برش از متغیرهای فازی ورودی، آسان می‌باشد، مورد استفاده قرار می‌گیرند. در صورتیکه به دست آوردن این مقادیر ماکزیمم و مینیمم مشکل باشد، از روش بهینه‌سازی مقید استفاده می‌شود. به دلیل اینکه در این تحقیق از روش ورتکس که یک روش تقریبی توسعه می‌باشد، در روش ترکیبی استفاده شده است. در ادامه این روش را توضیح می‌دهیم.

روش ورتکس بر پایه مفهوم برش α و تحلیل بازه‌ای استاندارد می‌باشد. نگاشت $y = f(x)$ در نظر گرفته می‌شود به طوری‌که پارامتر ورودی آن توسط عدد فازی \tilde{A} و خروجی توسط عدد فازی \tilde{B} تعریف می‌شوند. هنگامیکه تابع $f(x)$ در بازه $A_\alpha = [a, b]$ پیوسته و یکنواخت باشد، بازه \tilde{B} در برش α توسط رابطه زیر به دست می‌آید [۲۴]:

$$B_\alpha = f(A_\alpha) = [\min(f(a), f(b)), \max(f(a), f(b))] \quad (10)$$

در این روش، به دلیل پیوستگی و یکنواختی تابع در بازه‌ی مورد نظر، مقادیر ماکزیمم و مینیمم خروجی تابع در نقاط ابتدایی و انتهایی بازه به وجود می‌آیند و به دلیل اینکه در مسئله مورد مطالعه نیز این شرایط برقرار است، از روش ورتکس استفاده می‌شود.

۲-۲-۳- روش ترکیبی

در روش ترکیبی، از روش‌های آماری و روش‌های حساب فازی به‌طور همزمان استفاده می‌شود، بدین صورت که برای هر برش α پارامترهای فازی با توجه به خصوصیات آماری پارامترهای تصادفی، تحلیل آماری انجام می‌شود. خروجی این روش، متغیر فازی تصادفی می‌باشد. متغیر فازی تصادفی به متغیری گفته می‌شود که تابع عضویت آن با یک سطح اطمینانی بیان می‌شود [۲۵]. در واقع در این روش، با در نظر گرفتن مقادیر میانگین برای پارامترهای تصادفی و اعمال روش حساب فازی، تابع عضویت گرادیان هیدرولیکی به‌دست می‌آید. سپس با اعمال روش تخمین مرتبه اول برای مقادیر میانگین گرادیان هیدرولیکی در هر برش α ، برای هر کدام از این مقادیر، یک انحراف معیار به‌دست می‌آید. با در نظر گرفتن یک سطح اطمینان و با توجه به اینکه هر مقدار میانگین متناظر با یک مقدار انحراف معیار می‌باشد، می‌توان مقادیر ماکزیمم و مینیمم گرادیان هیدرولیکی در هر برش α را به‌دست آورد و با تکرار این عمل و جمع نتایج، تابع عضویت گرادیان هیدرولیکی به‌دست می‌آید. سپس، با توجه به این اصل که برش α در اعداد فازی معادل سطح اطمینان $(1 - \alpha) \%$ می‌باشد [۲۵] (که از اصل تبدیل قابل برداشت است) می‌توان ضریب تغییرات گرادیان هیدرولیکی را به‌دست آورد.

۲-۳- اطلاعات آزمایشگاهی و تولید داده‌های فازی ورودی

در این تحقیق، از داده‌های آزمایشگاهی تحقیق حسینی و جهانگیری [۱۹] استفاده شده است که در آن یک توده سنگریزه‌ای در آزمایشگاه ساخته شده به‌طوری‌که تغییرات منحنی دانه‌بندی آن در مقیاس کوچک مشابه سد باطله سونگون می‌باشد. در تحقیق حسینی و جهانگیری، d ، n ، K_t ، r_e و d_{15} به‌عنوان پارامترهای ورودی دارای عدم قطعیت معادلات جریان در محیط متخلخل درشت‌دانه در نظر گرفته شده‌اند و تمام پارامترها به‌صورت پارامتر تصادفی تعریف شده‌اند و به همین دلیل، از روش‌های آماری برای تجزیه و تحلیل عدم قطعیت استفاده شده است. در تحقیق آنها، برای محاسبه مشخصات آماری d ، n و d_{15} ، ۱۵ نمونه تصادفی از توده سنگریزه‌ای برداشته شد و برای هر نمونه مشخصات آماری پارامترهای مذکور شامل میانگین و ضریب تغییرات، محاسبه گردیدند. برای محاسبه خصوصیات آماری K_t و r_e ، ابتدا ۱۵ کارشناس با توجه به شکل دانه‌ها، این پارامترها را تخمین زدند که مقادیر آنها در جدول ۱ آورده شده‌اند. سپس، با استفاده از این مقادیر مشخصات آماری مورد نظر برای دو پارامتر مذکور محاسبه شدند. مشخصات آماری کلیه پارامترها در جدول ۲ مشاهده می‌شود.

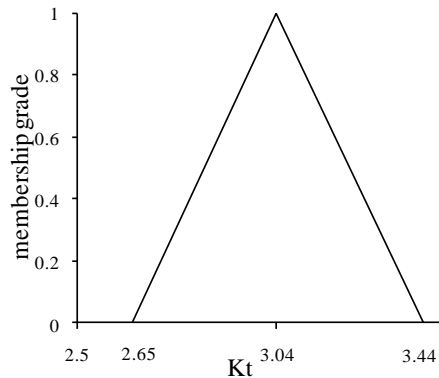
جدول ۱- نظرات کارشناسان در مورد پارامترهای فازی

K_t	۲/۹۴	۲/۹۸	۲/۹۴	۳/۱۴	۳/۰۴	۳/۱۴	۳/۳۰	۳/۳۶	۳/۱۵	۳/۰۳	۳/۰۴	۳/۱۰	۳/۱۴	۳/۳۴	۳/۱۲	۲/۹۵
r_e	۱/۷۷	۱/۸۰	۱/۷۶	۱/۸۱	۱/۸۳	۱/۸۴	۱/۸۷	۱/۸۵	۱/۸۳	۱/۸۳	۱/۸۲	۱/۸۳	۱/۸۳	۱/۸۸	۱/۸۴	۱/۸۰

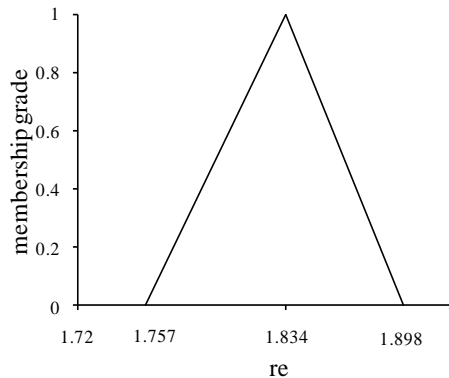
جدول ۲- خصوصیات آماری پارامترهای تصادفی

K_t	r_e	d_{15}	n	d	
۳/۱۰	۱/۸۲	۷ mm	۰/۳۹	۱۲/۹۳ mm	میانگین
۴/۵	۱/۸	۱۷/۱	۴/۳	۱۲/۱	ضریب تغییرات (%)

پارامترهای K_t و r_e ، توسط افراد کارشناس تعیین می‌شوند و مقادیر آنها به نظر متخصصین بستگی دارند و با دانش فعلی قابل اندازه‌گیری و نمونه‌برداری نمی‌باشند. به همین دلیل، این پارامترها دارای ماهیت فازی بوده و بایستی توسط اعداد فازی تعریف شوند. در تحقیق حاضر، این پارامترها به‌صورت فازی در نظر گرفته شده‌اند و بقیه پارامترها به‌صورت تصادفی منظور شده‌اند. در این راستا، با استفاده از مقادیر تخمین زده شده برای K_t و r_e توسط کارشناسان، می‌توان برای این پارامترها توابع عضویت تعریف کرد. برای این منظور، ابتدا نمودار ستونی با استفاده از تقسیم کل مجموعه به زیربازه‌هایی رسم می‌شود. انتخاب زیربازه‌ها بر این اساس است که در نهایت تابع عضویت دارای کوچکترین تکیه‌گاه باشد و نیز، نمودار ابتدا از یک روند صعودی و سپس نزولی برخوردار باشد یعنی شکلی مشابه تابع عضویت و خصوصیات اعداد فازی را دارا باشد. در نتیجه، انتخاب بازه‌ها برای رسیدن به تابع عضویت مطلوب، یک فرآیند تکراری می‌باشد. بعد از تشکیل نمودار ستونی، از روش کمترین مربعات برای تشکیل تابع عضویت استفاده می‌شود [۲۶]. توابع عضویت K_t و r_e به ترتیب، در اشکال ۲ و ۳ نشان داده شده‌اند.



شکل ۳- تابع عضویت K_t



شکل ۲- تابع عضویت r_e

۳- نتایج و بحث

در این بخش، نتایج روش ترکیبی برای دو معادله Stephenson و Wilkins با نتایج روش تخمین مرتبه اول برای این دو معادله در تحقیق حسینی و جهانگیری مقایسه می‌شوند. سپس، نتایج تجزیه و تحلیل عدم قطعیت با استفاده از روش ترکیبی برای دو معادله Stephenson و Wilkins و نتایج روش تخمین مرتبه اول برای معادله Adel با یکدیگر مقایسه می‌شوند. برای مقایسه عدم قطعیت حاصل از سه معادله، از ضریب تغییرات استفاده می‌شود. با توجه به اینکه خروجی تحلیل برای معادلات Stephenson و Wilkins، متغیر فازی تصادفی می‌باشد، برای تعریف ضریب تغییرات در اعداد فازی از رابطه بین برش α و فاصله اطمینان استفاده می‌شود. برش α در اعداد فازی معادل سطح اطمینان $(1 - \alpha)\%$ در توابع توزیع می‌باشد که این قضیه از اصل تبدیل قابل برداشت است [۲۶]. متغیر فازی تصادفی خروجی با سطح اطمینان ۹۵٪ به دست آمده است. در جدول ۳، نتایج روش ترکیبی تجزیه و تحلیل عدم قطعیت و روش تخمین مرتبه اول برای دو معادله Stephenson و Wilkins به‌ازاء سه سرعت انتخابی ارائه شده‌اند.

جدول ۳- نتایج تجزیه و تحلیل عدم قطعیت در روش تخمین مرتبه اول و روش ترکیبی برای معادلات Wilkins و Stephenson

روش تخمین مرتبه اول						روش ترکیبی						
Wilkins			Stephenson			Wilkins			Stephenson			
۰/۳۲	۰/۱۵	۰/۰۲	۰/۳۲	۰/۱۵	۰/۰۲	۰/۳۲	۰/۱۵	۰/۰۲	۰/۳۲	۰/۱۵	۰/۰۲	V(m/s)
۲۵/۳۶	۶/۲۴	۰/۱۵۰	۱۶/۶۷	۳/۷۶	۰/۰۸۹	۲۵/۳۷	۶/۲۴	۰/۱۵	۱۶/۲۶	۳/۶۷	۰/۰۸۷	E[i]
۰/۱۹	۰/۱۹	۰/۱۹	۰/۱۶	۰/۱۶	۰/۱۸	۰/۲۴	۰/۲۴	۰/۲۴	۰/۲۲	۰/۲۲	۰/۲۲	CV[i]

V(m/s) سرعت، E[i] امید ریاضی (میانگین)، CV[i] ضریب تغییرات

محاسبات برای سه سرعت متفاوت انجام شده است، به این دلیل که رفتار معادلات در سرعت‌های مختلف سنجیده شوند. با در نظر گرفتن ضریب تغییرات به‌عنوان معیار عدم قطعیت، مشاهده می‌شود که روش ترکیبی، عدم قطعیت بیشتری را برای معادلات Stephenson و Wilkins در مقایسه با روش تخمین مرتبه اول در تمام سرعت‌ها، نشان می‌دهد. در روش تخمین مرتبه اول پارامترهای K_t و r_e ، به‌صورت تصادفی مدل شده‌اند و به‌دلیل اینکه تعریف پارامترها به‌صورت تصادفی در مقایسه با حالت فازی، عدم قطعیت کمتری را به پارامتر ورودی اعمال می‌کند، عدم قطعیت خروجی در روش تخمین مرتبه اول کمتر می‌باشد. با این وجود، با توجه به اینکه در روش ترکیبی پارامترهای ورودی دارای عدم قطعیت بر اساس ماهیت واقعیشان تعریف شدند، این روش با واقعیت تطابق بیشتری دارد. همچنین، در روش ترکیبی مشابه روش تخمین مرتبه اول، عدم قطعیت خروجی حاصل از معادله Wilkins بیشتر از عدم قطعیت خروجی حاصل از معادله Stephenson است. ضریب تغییرات برای معادله Stephenson در روش ترکیبی و روش تخمین مرتبه اول، با افزایش سرعت کاهش می‌یابد که این کاهش در روش ترکیبی، نامحسوس می‌باشد و به‌دلیل گرد کردن اعداد در جدول ۳ مشاهده نمی‌شود. اما، برای معادله Wilkins در دو روش مذکور، در تمام سرعت‌ها ثابت می‌باشد که این مسئله به دلیل ساختار ریاضی این معادله می‌باشد که دارای یک عبارت ریاضی است. در جدول ۴، نتایج روش ترکیبی تجزیه و تحلیل عدم قطعیت برای معادلات Stephenson و Wilkins و نتایج روش تخمین مرتبه

اول تجزیه و تحلیل عدم قطعیت برای معادله Adel، ارائه شده‌اند. لازم به توضیح است که معادله Adel دارای پارامتر فازی نمی‌باشد لذا نیازی به استفاده از روش ترکیبی در تجزیه و تحلیل عدم قطعیت آن نمی‌باشد.

جدول ۴- تجزیه و تحلیل عدم قطعیت سه معادله Stephenson, Wilkins و Adel

Adel			Wilkins			Stephenson			
۰/۳۲	۰/۱۵	۰/۰۲	۰/۳۲	۰/۱۵	۰/۰۲	۰/۳۲	۰/۱۵	۰/۰۲	V(m/s)
۲۱/۸۶	۴/۹۷	۰/۱۲۳	۲۵/۳۷	۶/۲۴	۰/۱۵	۱۶/۲۶	۳/۶۷	۰/۰۸۷	E[i]
۰/۱۸	۰/۱۹	۰/۲۳	۰/۲۴	۰/۲۴	۰/۲۴	۰/۲۲	۰/۲۲	۰/۲۲	CV[i]

V(m/s) سرعت، E[i] امید ریاضی (میانگین)، CV[i] ضریب تغییرات

از مقایسه سه معادله Adel، Wilkins و Stephenson مشخص می‌شود که معادله Adel کمترین عدم قطعیت و معادله Wilkins بیشترین عدم قطعیت را در سرعت‌های متوسط و بالا دارا می‌باشند. در سرعت پایین، عدم قطعیت حاصل از سه معادله Stephenson و Wilkins و Adel تقریباً با یکدیگر برابر می‌باشند. در معادله Adel تمام پارامترها ماهیت تصادفی دارند درحالیکه معادلات Stephenson و Wilkins، ترکیبی از پارامترهای فازی و پارامترهای تصادفی را دارا می‌باشند و به دلیل اینکه پارامترهای فازی عدم قطعیت خروجی را افزایش می‌دهند، این معادلات در مقایسه با معادله Adel از عدم قطعیت بیشتری برخوردارند. از نظر مقدار میانگین گرادیان هیدرولیکی، معادله Wilkins بیشترین مقدار میانگین و معادله Stephenson کمترین مقدار میانگین را برای گرادیان هیدرولیکی نشان می‌دهند.

۴- نتیجه گیری کلی

در این تحقیق، به تجزیه و تحلیل عدم قطعیت معادلات Stephenson, Wilkins و Adel برای جریان در محیط متخلخل درشت‌دانه برای سرعت‌های قطعی مختلف، پرداخته شده است تا میزان عدم قطعیت در گرادیان هیدرولیکی ناشی از عدم قطعیت در پارامترهای فیزیکی ورودی، سنجیده شود. پارامترهای فیزیکی ورودی در معادلات Stephenson و Wilkins، ترکیبی از پارامترهای تصادفی و پارامترهای غیر تصادفی است درحالیکه معادله Adel تنها دارای پارامترهای تصادفی می‌باشد. به همین دلیل، از روش‌های ترکیبی و تخمین مرتبه اول برای معادلات Stephenson و Wilkins و از روش تخمین مرتبه اول برای معادله Adel استفاده شده است. نتایج تحلیل نشان می‌دهد که عدم قطعیت حاصل از روش ترکیبی در دو معادله Stephenson و Wilkins در سرعت‌های قطعی مختلف، بیشتر از روش تخمین مرتبه اول می‌باشد. با این وجود، روش ترکیبی با توجه به تعریف پارامترهای ورودی بر اساس ماهیت واقعی آن‌ها، با واقعیت تطابق بیشتری دارد. همچنین، در مقایسه سه معادله Stephenson, Wilkins و Adel از نقطه نظر عدم قطعیت، مشخص شد که معادله Adel در سرعت‌های بالا و متوسط عدم قطعیت کمتری نسبت به معادلات Stephenson و Wilkins دارد و در سرعت پایین سه معادله مذکور تقریباً عدم قطعیت یکسانی را دارا می‌باشند. معادله Stephenson عدم قطعیت کمتری نسبت به معادله Wilkins نشان می‌دهد که ناشی از ساختار ریاضی متفاوت این دو معادله می‌باشد.

۵- مراجع

1. Yen, B. C and Tung, Y. K. (1993), "Some Recent Progress in Uncertainty Analysis for Hydraulic Design," *Reliability and Uncertainty Analysis in Hydraulic Design*, B. C. Yen and Y. K. Tung, eds., ASCE Publications, USA.
2. Zhang, K. and Achari, G. (2010), "Correlation Between Uncertainty Theories and Their Application in Uncertainty Propagation," *The Proceeding of the 10th International Conference on Structure Safety and Reliability*, September 13-17, Osaka, Japan.
3. Kang, D. and Lansey, K. (2010), "Demand and Roughness Estimation in Water Distribution Systems," *Journal of Water Resources Planning and Managemet*, 137(1), pp 20-30.
4. Kang, D., Pasha, M. F. K. and Lansey, K. (2009), "Approximate Methods for Uncertainty Analysis of Water Distribution Systems," *Urban Water Journal*, 6(3), pp 233-249.
5. Jankovic, B., Maksimovic, C. and Graham, N. (2000), "Using a Monte Carlo Method for Active Leakage Control in Water Supply Networks," *Proc. of the 4th Hydroinformatics conference*, July 23-27, Iowa, USA.
6. Crystal Ng, G. H., McLaughlin, D., Entekhabi, D. and Scanlon, B. R. (2010), "Probabilistic Analysis of the Effects of Climate Change on Groundwater Recharge," *Journal of Water Resources Research*, 46, pp 1-18.

7. Ye, M., Pohlmann, K. F., Chapman, J. B., Pohl, G. M. and Reeves, D. M. (2009), "A Model-Averaging Method for Assessing Groundwater Conceptual Model Uncertainty," *Journal of Ground Water*, 48(5), pp 716-728.
8. Kunstmann, H., Kinzelbach, W. and Siegfried, T. (2002), "Conditional First-Order Second-Moment Method and its Application to the Quantification of Uncertainty in Groundwater Modeling," *Journal of Water Resources Research*, 38(4), pp 1-14.
9. Revelli, R. and Ridolfi, L. (2003), "Fuzzy Approach for Analysis of Pipe Networks," *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(1), pp 93-101.
10. Branisavljevic, N. and Ivetic, M. (2006), "Fuzzy Approach in the Uncertainty Analysis of the Water Distribution Network of Becej," *Journal of Civil Engineering and Environmental Systems*, 23(3), pp 221-236.
11. Gupta, R. and Bhave, P. R. (2007), "Fuzzy Parameters in Pipe Network Analysis," *Journal of Civil Engineering and Environmental Systems*, 24(1), pp 33-54.
12. Abebe, A. J., Guinot, V. and Solomatine, D. P. (2000), "Fuzzy Alpha-cut vs. Monte Carlo Techniques in Assessing Uncertainty in Model Parameters," *Proc. of the 4th Hydroinformatics conference*, July 23-27, Iowa, USA.
13. Kumar, V. and Schuhmacher, M. (2005), "Fuzzy Uncertainty Analysis in System Modelling," *Proc. of the 38th European Symposium of the Working Party on Computer Aided Process Engineering*, 29 May-1 June, Barcelona, Spain.
14. Ganoulis, J. (2006), "Fuzzy Modelling for Uncertainty Propagation and Risk Quantification in Environmental Water Systems," *Proc. of the NATO Advanced Research Workshop on Computational Models of Risks to Infrastructure*, May 9-13, Primosten, Croatia.
15. Mpimpas, H., Anagnostopoulos, P. and Ganoulis, J. (2008), "Uncertainty of Model Parameters in Stream Pollution Using Fuzzy Arithmetic," *Journal of Hydroinformatics*, 10(3), pp 189-200.
16. Zhang, K., Achari, G. and Li, H. (2009b), "A Comparison of Numerical Solutions of Partial Differential Equations with Probabilistic and Possibilistic Parameters for the Quantification of Uncertainty in Subsurface Solute Transport," *Journal of Contaminant Hydrology*, 110, pp 45-59.
17. Faybishenko, B. (2010), "Fuzzy-Probabilistic Calculations of Water-Balance Uncertainty," *Journal of Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 24(6), pp 939-952.
18. Li, H. and Zhang, K. (2010), "Development of a Fuzzy-Stochastic Nonlinear Model to Incorporate Aleatoric and Epistemic Uncertainty," *Journal of Contaminant Hydrology*, 111(4), pp 1-12.
۱۹. حسینی، س. م. و جهانگیری، م. (۱۳۹۰)، "تجزیه و تحلیل عدم قطعیت و حساسیت روابط برآورد عامل‌های هیدرولیکی جریان در محیط سنگریزه،" *مجله علمی - پژوهشی علوم و مهندسی آب‌خیزداری ایران*، ۵(۱۴)، ۶۱-۷۰.
20. Ping, H., Zhao, Z., Guodong, C. and Hui, B. (2007), "Ventilation Properties of Blocky Stones Embankments," *Journal of Cold Regions Science and Technology*, 47(3), pp 271-275.
21. Hosseini, S. M. (2000), "Statistical Evaluation of the Empirical Equation that Estimate Hydraulic Parameters Flow through Rockfill," In *Stochastic Hydraulic '00*, Z. Y. Wang and S. X. Hu (ed.), Balkema, Beijing, China.
22. Tung, Y. K. (1996), "Uncertainty Analysis in Water Resources Engineering," In *Stochastic Hydraulic '96*, K. S. Tickle, I. C. Goulter, C. Xu, S. A. Wasimi and F. Bouchart (ed.), Balkema, Rotterdam, Netherlands.
23. Zadeh, L. A. (1965), "Fuzzy Sets," *Information and Control*, 8(3), pp 338-353.
24. Ross, T. J. (2010), "*Fuzzy Logic with Engineering Applications*," 3rd Edition, Wiley, England.
25. Guyonnet, D., Bourguine, B., Dubois, D., Fargier, H., Come, B. and Chiles, J. P. (2003), "Hybrid Approach for Addressing Uncertainty in Risk Assessments," *Journal of Environmental Engineering*, 128(1), pp 68-78.
26. Moller, B. and Beer, M. (2005), "*Fuzzy Randomness, Uncertainty in Civil Engineering and Computational Mechanics*," Springer, Germany.