مجله علمی- پژوهشی
دوره ۷، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۱

تحلیل عدم‌قطعیت محاسبات پروفیل سطح آب در سازه‌های سنگریزه‌ای 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

[*] **مشهد، میدان آزادی، دانشگاه فردوسی مشهد**

shossein@um.ac.ir

چکیده- سنگریزه یکی از مصالح مورد استفاده در سازه‌های هیدرولیکی است. محاسبات پروفیل سطح آب در طراحی و ارزیابی عملکرد بسیاری از سازه‌های هیدرولیکی سنگریزه‌ای لازم می‌شود. در محاسبات پروفیل سطح آب در سازه‌های سنگریزه‌ای، برخی از پارامترهای فیزیکی به‌صورت دقیق قابل اندازه‌گیری نمی‌باشند و دارای عدم‌قطعیت هستند. با استفاده از تحلیل عدم‌قطعیت می‌توان عدم‌قطعیت در خروجی یک مدل را که ناشی از عدم‌قطعیت در پارامترهای ورودی آن می‌باشد، محاسبه کرد. در این تحقیق، تحلیل عدم‌قطعیت محاسبه پروفیل سطح آب در سازه‌های سنگریزه‌ای با در نظر گرفتن برخی از پارامترها به‌صورت تصادفی و برخی به‌صورت فازی، با استفاده از روش ترکیبی که یک روش احتمالاتی فازی می‌باشد، برای دو معادله Stephenson و Wilkins انجام شده است و نتایج با نتایج یک مدل آزمایشگاهی مقایسه شده‌اند. نتایج مؤید این است که برآورد میانگین معادله Stephenson مطابقت بیشتری با نتایج آزمایشگاهی دارد. همچنین، در صورت برآورد مناسب پارامترهای فازی، معادله Stephenson عدم‌قطعیت کمتری را نشان می‌دهد.

کلید واژگان: پروفیل سطح آب، تحلیل عدم‌قطعیت، روش احتمالاتی فازی، سنگریزه.

۱- مقدمه

استفاده از سنگریزه به‌عنوان مصالح ساخت در بسیاری از سازه‌های هیدرولیکی نظیر سدهای سنگریزه‌ای، گابیون‌ها، سرریزها، موج‌شکن‌ها امری متداول است. دلیل این امر را می‌توان ارزانی، هماهنگی با شرایط محیط طبیعی و ویژگی‌های هیدرولیکی به‌دلیل متخلخل بودن محیط ذکر نمود. مطالعات فراوانی نیز در این زمینه صورت گرفته است و کتب مرجعی نیز به نگارش در آمده است (Stephenson, 1979; CIRIA et al., 2007). یکی از محاسبات متداول در بسیاری از سازه‌های سنگریزه‌ای، محاسبات مربوط به تغییرات عمق جریان یا به عبارت دیگر پروفیل سطح آب در این گونه سازه‌ها می‌باشد، که مطالعات فراوانی را به خود اختصاص داده است. در این مطالعات، هم در جریان‌های دائمی و هم غیردائمی، تحلیل‌های یک بعدی جریان (Bari and Hansen, 2002; Garga et al., 1989; Greenly and Joy, 1996; Hosseini and Joy, 2006; Hosseini and Joy, 2007; Leps, 1973; Parkin, 1991; Stephenson, 1978; Stephenson, 1979) و دو بعدی جریان (حسینی و صنعی، ۱۳۸۲)؛ (Kells, 1993;

McCorquodale, 1970; Samani et al., 2003; Townsend et al., 1991; Volker, 1969; Volker, 1975) به خدمت گرفته شده‌اند. ولی تحلیل یک بعدی جریان به‌دلیل سهولت محاسباتی در مسائل عملی و برآورد دقت لازم در این گونه مسائل، خصوصاً در سازه‌هایی که نسبت طول به عمق آنها زیاد می‌باشد، مقبولیت بیشتری دارد. با وجود تثبیت نسبی دیدگاه‌های محاسباتی در موضوع تعیین پروفیل سطح آب، یکی از چالش‌هایی که مهندسان امروزه با آن روبرو هستند، تحلیل عدم‌قطعیت در محاسبات مربوط به طراحی‌ها و یا ارزیابی عملکرد سازه‌ها می‌باشد که تحلیل عدم‌قطعیت در محاسبات نیمرخ سطح آب نیز از این روند مستثنی نیست. قطعاً با ظهور روش‌ها و مفاهیم جدید در تحلیل عدم‌قطعیت، این روش‌ها می توانند در هر زمینه‌ای به خدمت گرفته شوند.

همان طور که نمی‌توان از عدم‌قطعیت‌های موجود در زندگی دوری جست، در پروژه‌های مهندسی نیز نمی‌توان از عدم‌قطعیت‌ها صرف‌نظر کرد. عدم‌قطعیت خروجی یک مدل ریاضی به‌دلیل عدم‌قطعیت در ساختار ریاضی مدل و یا به‌دلیل عدم‌قطعیت موجود در پارامترهای ورودی به آن مدل می‌باشد. هدف از تحلیل عدم‌قطعیت ناشی از پارامترهای ورودی، تعیین عدم‌قطعیت خروجی مدل با اعمال عدم‌قطعیت پارامترهای ورودی به آن مدل می‌باشد. تحلیل عدم‌قطعیت یک چهارچوب منظم و سیستماتیک برای کمّی کردن عدم‌قطعیت‌های خروجی مدل تهیه می‌کند و با استفاده از آن می‌توان تأثیر پارامترهای ورودی را بر عدم‌قطعیت کلی خروجی مدل تعیین کرد (Yen and Tung, 1993).

برای تحلیل عدم‌قطعیت، روش‌های مختلفی وجود دارد که به نوع عدم‌قطعیت پارامترهای ورودی بستگی دارد. عدم‌قطعیت پارامترها را می‌توان به دو گروه کلی عدم‌قطعیت تصادفی و عدم‌قطعیت غیرتصادفی تقسیم کرد. در عدم‌قطعیت تصادفی، خصوصیات آماری پارامتر مورد نظر با استفاده از نمونه‌برداری محاسبه شده و از روش‌های آماری برای تحلیل عدم‌قطعیت استفاده می‌شود (Zhang and Achari, 2010). روش‌های آماری در بسیاری از مسایل هیدرولیکی مورد استفاده قرار گرفته‌اند که در ادامه به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود. در زمینه تحلیل عدم‌قطعیت سیستم‌های توزیع آب می‌توان به کارهای Kang and Lansey (2010)، Kang et al. (2009) و Jankovic et al. (2000) اشاره کرد. همچنین، در زمینه تحلیل عدم‌قطعیت مدل‌سازی ریاضی جریان آب زیرزمینی می‌توان به کارهای Crystal et al. (2010)، Ye et al. (2009) و Kunstmann et al. (2002) اشاره کرد. در این تحقیق‌ها، از روش‌های آماری شبیه‌سازی مونت‌کارلو، شبیه‌سازی مونت‌کارلو با نمونه‌گیری مربع لاتین و تخمین مرتبه اول برای تحلیل عدم‌قطعیت مدل ریاضی موردنظر استفاده شده است. عدم‌قطعیت غیرتصادفی، به‌دلیل کمبود اطلاعات، مبهم بودن اطلاعات، استفاده از عبارات کلامی به‌جای اعداد یا کسب اطلاعات بر اساس نظر افراد باتجربه ایجاد می‌شود (Zhang and Achari, 2010). در این گونه مسایل از روش‌های حساب فازی برای تحلیل عدم‌قطعیت استفاده می‌شود که بر پایه تئوری فازی بنا شده‌اند و پارامترهای ورودی توسط متغیرهای فازی بیان می‌شوند. این روش‌ها نیز در مسایل هیدرولیکی مورد استفاده قرار گرفته‌اند که چند نمونه از آنها در ادامه ذکر می‌شوند. Revelli and Ridolfi (2002)، Branisavljevic and Ivetic (2006) و Gupta and Bhave (2007) به تحلیل عدم‌قطعیت سیستم‌های توزیع آب با استفاده از روش حساب فازی پرداخته‌اند. همچنین، Abebe et al. (2000)، Kumar and Schuhmacher (2005)، Ganoulis (2006) و Mpimpas et al. (2008) عدم‌قطعیت آلودگی جریان در رودخانه‌ها و آب‌های زیرزمینی را تحلیل کرده‌اند.

در برخی از مسایل، ترکیبی از پارامترهای تصادفی و غیرتصادفی وجود دارد که برای تحلیل عدم‌قطعیت 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 به‌صورت 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 et al. (2009) به تحلیل عدم‌قطعیت انتقال آلاینده در جریان آب زیرزمینی پرداخته‌اند و از روش‌های مختلف احتمالاتی فازی شامل روش تبدیل[1] و روش ترکیبی[2]، استفاده کرده‌اند.

Faybishenko (2010) عدم‌قطعیت موجود در معادله بیلان آب را مورد بررسی قرار داد و برای این منظور برخی از پارامترها را به‌صورت فازی و برخی را به‌صورت آماری درنظر گرفت و از روش ترکیبی برای تحلیل عدم‌قطعیت استفاده کرد. Li and Zhang (2010) جریان آب‌زیرزمینی را با پارامترهای غیردقیق مدل کردند و برای این منظور یک روش احتمالاتی فازی (روش تبدیل) را به کار گرفتند.

در تحقیق حاضر، از روش ترکیبی به‌عنوان یک روش احتمالاتی فازی برای تحلیل عدم‌قطعیت دو معادله Stephenson و Wilkins در محاسبه پروفیل سطح آب در یک توده سنگریزه‌ای استفاده شده است. برای این منظور از داده‌های آزمایشگاهی تحقیق Bari (1997) استفاده شده است که در تحلیل عدم قطعیت[3] این محقق، تمام پارامترها به‌صورت تصادفی در نظر گرفته شده‌اند و یک روش آماری برای تحلیل عدم‌قطعیت مورد استفاده قرار گرفته است. در تحقیق حاضر، با ذکر دلیل، پارامترها بر اساس ماهیت واقعی آن‌ها تعریف شده‌اند و نتایج حاصل از روش احتمالاتی فازی برای دو معادله مرسوم Stephenson و Wilkins با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

1. Transformation Method
2. Hybrid Method
3. Uncertainty

۲- مواد و روش‌ها

در این بخش، ابتدا به بررسی مختصر محاسبات پروفیل سطح آب در سازه‌های سنگریزه‌ای پرداخته می‌شود. سپس، روش‌های تحلیل عدم‌قطعیت شامل روش تخمین نقطه‌ای (به‌عنوان یک روش آماری)، روش حساب فازی (به همراه مفاهیمی از منطق فازی) و روش ترکیبی (روش مورد استفاده در این تحقیق) معرفی و مورد بررسی قرار می‌گیرند. در زیربخش پایانی، نتایج آزمایشگاهی Bari (1997) و روش تولید داده‌های تصادفی توسط این محقق ارائه می‌شوند. همچنین، در زیربخش مذکور، داده‌های فازی و روش تولید آنها که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته‌اند، معرفی می‌شوند.

۲-۱- محاسبات پروفیل سطح آب در سازه‌های سنگریزه‌ای

به‌صورت معمول و به منظور سادگی، در عمل برای محاسبه پروفیل سطح آب در سازه‌های سنگریزه‌ای، از معادله یک‌بعدی حاکم بر جریان در کانال‌های آب استفاده می‌شود که در آن از معادلات جریان در سازه‌های سنگریزه‌ای برای محاسبه شیب اصطکاکی استفاده می‌شود. این معادله عبارت است از (Bari and Hansen, 2003):

$$\frac{dy}{dx}=\frac{S_0-i}{1-\frac{Q^2T}{gA^3n^2}} \qquad (۱)$$

که در آن، x فاصله در طول مسیر، y عمق آب، S_0 شیب طولی مسیر، i گرادیان هیدرولیکی (معادل شیب اصطکاکی)، Q دبی جریان، A سطح مقطع جریان، n تخلخل[4] (نسبت حجم فضای خالی توده خاک به حجم کل توده خاک) و T عرض سطح آزاد آب، می‌باشند. گرادیان هیدرولیکی به خواص فیزیکی محیط متخلخل بستگی دارد و برای محاسبه آن در عمل از روابط تجربی استفاده می‌شود. با توجه به اینکه جریان در محیط

4. Porosity

متخلخل متشکل از سنگریزه، از قانون خطی دارسی پیروی نمی‌کند، روابط تجربی بر اساس معادله جریان غیردارسی که غیرخطی می‌باشد، ارائه شده‌اند. در ادامه دو معادله تجربی که پیش‌بینی بهتری از جریان در محیط متخلخل را ارائه می‌دهند (Hosseini, 2000) و در این تحقیق و همچنین تحقیق Bari (1997) استفاده شده‌اند، بررسی می‌شوند.

۱- معادله Stephenson (Hosseini, 2000):

$$i = \frac{800\nu}{g\,n\,d^2}V + \frac{K_t}{n^2\,g\,d}V^2 \qquad (۲)$$

۲- معادله Wilkins (Hosseini, 2000):

$$i = \frac{1}{m^{0.93}}\left(\frac{V}{W\,n}\right)^{1.85} \qquad (۳)$$

که در روابط (۲) و (۳)، i گرادیان هیدرولیکی، V سرعت دارسی، n تخلخل، ν لزجت جنبشی سیال، g شتاب جاذبه زمین، d اندازه میانگین هارمونیک مصالح، K_t فاکتور اصطکاک[1] در ناحیه جریان آشفته، W مقدار ثابتی که در دستگاه بین المللی آحاد (SI) برابر ۵/۲۴۳ است، می‌باشند. پارامتر کلیدی در رابطه ویلکینز m می‌باشد که شعاع هیدرولیکی منفذی نام دارد و از رابطه (۴) به‌دست می‌آید (Hosseini, 2000):

$$m = \frac{e\,d}{6r_e} \qquad (۴)$$

که در آن، e نسبت تخلخل[2] (نسبت حجم فضای خالی توده خاک به حجم ذرات جامد توده خاک) و r_e راندمان نسبی سطح ذرات[3] 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 ۱/۶ بوده 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 (Bari and Hansen, 2003).

برای محاسبه پروفیل سطح آب در محیط متخلخل، می‌توان از همان روش‌هایی که برای تحلیل جریان در کانال‌های باز مورد استفاده قرار می‌گیرند، استفاده کرد که در اینجا از روش گام به گام استاندارد استفاده شده است. اساس این روش معادله انرژی بین دو مقطع از جریان می‌باشد (حسینی و ابریشمی، ۱۳۸۹). برای این منظور برای یک دبی ثابت، طول مسیر به N گره یا مقطع تقسیم شده و معادله انرژی بین دو مقطع کنار هم در یک بازه مطابق رابطه ۵ نوشته می‌شود.

$$H_j - \bar{i}\,\Delta x = H_{j+1} \qquad (۵)$$

در رابطه ۵، H_j و H_{j+1} به ترتیب به انرژی کل در مقاطع متوالی j و $j+1$ که به فاصله Δx از هم قرار دارند، اشاره دارند و $\bar{i}$ گرادیان هیدرولیکی متوسط در آن بازه می‌باشد. در صورتی که به صورت معمول از میانگین‌گیری حسابی در تعیین گرادیان هیدرولیکی متوسط استفاده شود، رابطه ۵ به صورت رابطه ۶ نوشته می‌شود.

$$Z_j + y_j + \frac{Q^2}{2g\,A_j^2} - \Delta x\left(\frac{i_j + i_{j+1}}{2}\right) = Z_{j+1} + y_{j+1} + \frac{Q^2}{2g\,A_{j+1}^2} \qquad (۶)$$

که در آن، Z_j و Z_{j+1} تراز ارتفاعی کف مسیر از سطح مبنا به‌ترتیب برای مقاطع j و $j+1$، A_j و A_{j+1} مساحت جریان به‌ترتیب در مقاطع j و $j+1$، y_j و y_{j+1} عمق آب به‌ترتیب در مقاطع j و $j+1$ و Q دبی جریان می‌باشند. همچنین، i_j و i_{j+1} گرادیان هیدرولیکی به ترتیب در مقاطع j و $j+1$ هستند که از روی معادلات نظیر ۲ و ۳ به ازای هر سرعت جریان (Q/A) برآورد می‌شوند. لازم به توضیح است که رابطه ۶ در حقیقت همان شکل گسسته معادله یک‌بعدی حاکم بر جریان یعنی رابطه ۱ می‌باشد.

اعماق در مسیر جریان با حل نوبتی معادله ۶ بین دو مقطع جریان به‌دست می‌آیند. این امر به این صورت انجام می‌شود که در گام اول با شروع از مقطع کنترل جریان با

1. Friction Coefficient
2. Void Ratio
3. Relative Surface Area Efficiency

عمق دیکته‌شده مشخص(j=1)، و حل معادله ۶، عمق در مقطع بعدی و یا مجاور (j=2) به‌دست می‌آید. در مرحله بعد، رابطه ۶ بین دو مقطع ۲ و ۳ حل می‌شود تا عمق در مقطع ۳ به‌دست آید. فرآیند حل نوبتی معادله ۶ تا تعیین عمق در تمام مقاطع ادامه می‌یابد. در تحقیق حاضر، برای حل معادله ۶ از روش آزمون و خطا استفاده شده است. همچنین، عمق آب در خروجی سازه که از نتایج آزمایشگاهی برداشت شده است، به‌عنوان مقطع کنترل درنظر گرفته شده است.

همان طور که در روابط مذکور مشاهده می‌شود، پارامترهای متعددی در محاسبه پروفیل سطح آب در سازه سنگریزه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند. برخی از این پارامترها در معرض عدم‌قطعیت بوده و به‌صورت دقیق قابل اندازه‌گیری نمی‌باشند. از پارامترهای مربوط به محیط متخلخل می‌توان به پارامترهای d، n، K_t و r_e اشاره کرد. همچنین، در صورت استفاده از روش‌های مختلف برای برآورد دبی، برای این پارامتر نیز می‌توان عدم‌قطعیت درنظر گرفت. با درنظر گرفتن عدم‌قطعیت برای پارامترهای ورودی مدل، خروجی مدل که عمق آب می‌باشد، در معرض عدم‌قطعیت قرار می‌گیرد که با استفاده از روش‌های تحلیل عدم‌قطعیت، عدم‌قطعیت خروجی مدل محاسبه می‌شود.

۲-۲- روش‌های تحلیل عدم‌قطعیت

در این بخش، ابتدا روش تخمین مرتبه اول[1] (به‌عنوان یک روش آماری) -که در تحقیق Bari (1997) مورد استفاده قرار گرفته است- بررسی می‌شود. دلیل این معرفی این است که داده‌های این محقق در کار حاضر استفاده شده‌اند. سپس، روش حساب فازی -که در روش ترکیبی مورد استفاده قرار گرفته است- توضیح داده می‌شود. در انتها نیز روش ترکیبی -که در تحقیق حاضر به مسأله اعمال شده است- بیان می‌شود.

۲-۲-۱- روش تخمین مرتبه اول

در تحقیق Bari (1997) از روش تخمین مرتبه اول برای تحلیل عدم‌قطعیت استفاده شده است. در این روش، میزان عدم‌قطعیت خروجی یک مدل بر اساس ویژگی‌های آماری پارامترهای تصادفی مدل برآورد می‌شود. نظریهٔ اصلی این روش، تقریب مدل دارای پارامترهای تصادفی با استفاده از بسط سری تیلور می‌باشد. فرض کنید که کمیت هیدرولیکی یا هیدرولوژیکی Z به N متغیر تصادفی به‌شکل رابطه زیر مرتبط باشد (Tung, 1996):

$$Z = g(X) = g(X_1, X_2, ..., X_N) \quad (۷)$$

که در آن، $X = (X_1, X_2, ..., X_N)^t$، یک بردار ستونی N بعدی از پارامترهای مدل است به‌طوریکه تمام Xها در معرض عدم‌قطعیت می‌باشند. بالانویس t نشان دهندهٔ ترانهاده ماتریس یا بردار است. بسط سری تیلور مرتبه اول تابع $g(X)$ نسبت به نقطه $X = x_0$ در فضای پارامتری به‌صورت رابطه (۸) بیان می‌شود (Tung, 1996).

$$Z \approx g(x_0) + s_0^t . (X - x_0) \quad (۸)$$

که در آن، s_0 بردار ستونی از ضریب حساسیت است که هر درایه آن به‌صورت $\frac{\partial Z}{\partial X_i}$ نشان داده می‌شود و در نقطه $X = x_0$ محاسبه می‌شود. میانگین و واریانس Z با استفاده از روش تخمین مرتبه اول به‌صورت روابط زیر بیان می‌شوند (Tung, 1996):

$$E[Z] \approx g(x_0) + s_0^t . (\mu - x_0) \quad (۹)$$

$$Var[Z] = s_0^t C s_0 \quad (۱۰)$$

که در روابط ۹ و ۱۰، μ و C به‌ترتیب 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 عدم‌قطعیت مورد استفاده قرار می‌گیرند (Tung, 1996).

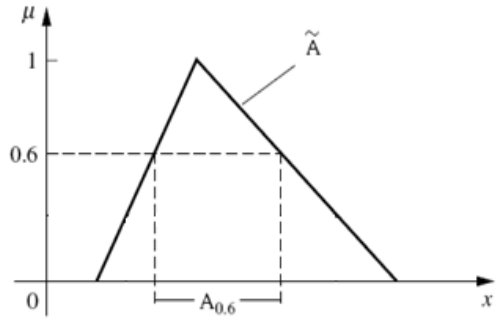
1. First-Order Variance Estimation Method

۲-۲-۲- روش حساب فازی

تئوری فازی به‌وسیله لطفی‌زاده در سال ۱۹۶۵ معرفی شد (Zadeh, 1965). 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 عدم‌قطعیت در معادلات حاکم بر پدیده‌های مختلف استفاده می‌شود (Ross, 2010). در روش‌های حساب فازی، پارامترهای ورودی دارای عدم‌قطعیت توسط اعداد فازی بیان می‌شوند که این اعداد به‌وسیله توابع عضویت[1] 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 است. 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 (۱۱) تعریف می‌شود (Ross, 2010):

$$A_\alpha = \{x \mid \mu_{\tilde{A}}(x) \geq \alpha\} \qquad (۱۱)$$

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 ۰/۶ آن نشان داده شده است.



شکل ۱ عدد فازی مثلثی $\tilde{A}$ و برش ۰/۶ آن

برای اعمال پارامترهای فازی ورودی به مدل و به‌دست آوردن عدم‌قطعیت 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 بیشینه و کمینه خروجی مدل محاسبه می‌شود و با تجمیع نتایج برش‌های مختلف، عدد فازی خروجی به‌دست می‌آید. سپس، با استفاده از رابطه بین مفهوم برش α در اعداد فازی و فاصله اطمینان در توابع توزیع، عدم‌قطعیت خروجی مدل 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، در حالی که دو روش دیگر برای متغیرهای ورودی پیوسته کاربرد دارند. روش‌های تقریبی توسعه برای مدل‌هایی که پیچیده نیستند و به‌دست آوردن مقادیر بیشینه و کمینه خروجی مدل در هر برش از متغیرهای فازی ورودی، آسان می‌باشد، مورد استفاده قرار می‌گیرند. در صورتی که به‌دست آوردن این مقادیر بیشینه و کمینه مشکل باشد، از روش بهینه‌سازی مقید استفاده می‌شود. به‌دلیل اینکه در این تحقیق از روش ورتکس -که یک روش تقریبی توسعه می‌باشد- در روش ترکیبی استفاده شده است، در ادامه این روش توضیح داده می‌شود.

روش ورتکس بر پایه مفهوم برش α و تحلیل بازه‌ای استاندارد می‌باشد. نگاشت $y = f(x)$ درنظر گرفته می‌شود، به‌طوری که 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 (۱۲) به‌دست می‌آید (Ross, 2010):

$$B_\alpha = f(A_\alpha) = [\min(f(a), f(b)), \max(f(a), f(b))] \qquad (۱۲)$$

در این روش، به‌دلیل پیوستگی و یکنواختی تابع در بازه‌ی

1. Membership Functions

مورد نظر، مقادیر بیشینه و کمینه خروجی تابع در نقاط ابتدایی و انتهایی بازه به‌وجود می‌آیند و به‌دلیل این که در مسأله مورد مطالعه نیز این شرایط برقرار است، از روش ورتکس استفاده شده است.

۲-۲-۳- روش ترکیبی

در مسائلی که برخی از پارامترها به‌صورت فازی و برخی از پارامترها به‌صورت تصادفی تعریف شده‌اند، از روش ترکیبی برای تحلیل عدم‌قطعیت استفاده می‌شود. در روش ترکیبی، از روش‌های آماری و روش‌های حساب فازی به طور هم‌زمان استفاده می‌شود. با توجه به این که در تحقیق Bari (1997) از روش تخمین مرتبه اول استفاده شده است، در تحقیق حاضر نیز روش مذکور در روش ترکیبی به کار گرفته شد. در روش ترکیبی، 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 (Guyonnet et al., 2003). در واقع در این روش، با در نظر گرفتن مقادیر میانگین برای پارامترهای تصادفی و اعمال روش حساب فازی، تابع عضویت میانگین خروجی مدل (که در اینجا عمق آب در هر مقطع می‌باشد) به‌دست می‌آید. سپس با اعمال روش تخمین مرتبه اول برای مقادیر میانگین خروجی در هر برش α، برای هر کدام از مقادیر میانگین، یک انحراف معیار به‌دست می‌آید. با توجه به اینکه در این تحقیق از معادلات Stephenson و Wilkins در محاسبه پروفیل سطح آب استفاده شده است، با استفاده از روش تخمین مرتبه اول، انحراف معیار عمق آب در دو حالت استفاده از معادلات Stephenson و Wilkins، با درنظر گرفتن پارامترهای d، n و Q به‌عنوان متغیرهای تصادفی، به‌ترتیب توسط روابط ۱۳ و ۱۴ محاسبه می‌شوند (Bari and Hansen, 2002).

$$\tilde{\sigma}_y = \tilde{\bar{y}}\,[(CV_Q)^2+(0.5CV_d)^2+(CV_n)^2]^{0.5} \quad (۱۳)$$

$$\tilde{\sigma}_y = \tilde{\bar{y}}\,[(CV_Q)^2+(0.5CV_d)^2+(\Omega CV_n)^2]^{0.5} \quad (۱۴)$$

که در آنها، $\tilde{\bar{y}}$ مقدار میانگین عمق آب به‌صورت یک عدد فازی، CV_Q ضریب تغییرات دبی، CV_d ضریب تغییرات اندازه میانگین ذرات، CV_n ضریب تغییرات تخلخل و $\tilde{\sigma}_y$ انحراف معیار عمق آب به‌صورت یک عدد فازی، می‌باشند (Bari and Hansen,2002). Ω نیز توسط رابطه (۱۵) بیان می‌شود (Bari, 1997):

$$\Omega = 0.5\left(\frac{3-2\bar{n}}{1-\bar{n}}\right) \quad (۱۵)$$

که در آن، $\bar{n}$ مقدار میانگین تخلخل می‌باشد.

در روابط بالا، برای محاسبه $\tilde{\bar{y}}$، مقادیر میانگین پارامترهای تصادفی در ترکیب با پارامترهای فازی (که در این تحقیق K_t و r_e می‌باشند) در معادله روش گام به گام استاندارد (رابطه ۶) مورد استفاده قرار می‌گیرند. در نتیجه رابطه ۶ به‌صورت رابطه (۱۶) در می‌آید:

$$Z_j+\tilde{\bar{y}}_j+\frac{\bar{Q}^2}{2g\,\tilde{\bar{A}}_j^{\,2}}-\Delta x\left(\frac{\tilde{\bar{i}}_j+\tilde{\bar{i}}_{j+1}}{2}\right) = Z_{j+1}+\tilde{\bar{y}}_{j+1}+\frac{\bar{Q}^2}{2g\,\tilde{\bar{A}}_{j+1}^{\,2}} \quad (۱۶)$$

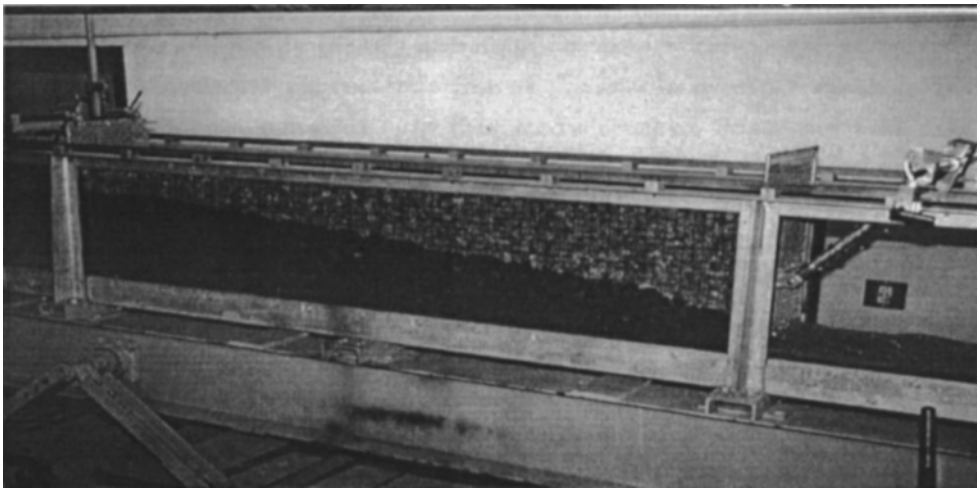
در این رابطه، $\tilde{\bar{i}}_j$ و $\tilde{\bar{i}}_{j+1}$ میانگین فازی گرادیان هیدرولیکی به‌ترتیب در مقاطع j و j+1، $\bar{Q}$ میانگین دبی جریان، $\tilde{\bar{A}}_j$ و $\tilde{\bar{A}}_{j+1}$ میانگین فازی مساحت جریان به‌ترتیب در مقاطع j و j+1 می‌باشند. مقادیر میانگین گرادیان هیدرولیکی به‌دلیل وجود پارامترهای فازی K_t و r_e به صورت اعداد فازی بیان می‌شوند و در نتیجه عمق مجهول جریان در مقطع j+1 نیز به‌صورت یک عدد فازی به‌دست می‌آید. با اعمال روش در کل مسیر، عمق آب در هر مقطع (به‌غیر از مقطع کنترل) به‌صورت یک عدد فازی محاسبه می‌شود. لازم به ذکر است که با توجه به اینکه در گام اول، مقطع ۱، مقطع کنترل است، عمق آب و مساحت جریان در مقطع ۱ در گام اول به‌صورت یک عدد قطعی می‌باشند. در نتیجه، مطابق روابط ۱۳ و ۱۴ انحراف معیار

عمق آب یک عدد فازی می‌باشد. با در نظر گرفتن یک سطح اطمینان و با توجه به این که هر مقدار میانگین متناظر با یک مقدار انحراف معیار می‌باشد، می‌توان مقادیر بیشینه و کمینه عمق آب در هر برش α را در هر مکان به‌دست آورد و با تکرار این عمل و تجمیع نتایج، تابع عضویت عمق آب در هر مکان به‌دست می‌آید. سپس، با توجه به این اصل که برش α در اعداد فازی معادل سطح اطمینان $(1-\alpha)\%$ می‌باشد (Guyonnet et al., 2003) – که از اصل تبدیل قابل برداشت است– می‌توان بازهٔ تغییرات پروفیل سطح آب را در سطح اطمینان مورد نظر به‌دست آورد.

۲-۳- اطلاعات آزمایشگاهی و تولید داده‌های فازی ورودی مورد استفاده در این تحقیق

در تحقیق حاضر، از داده‌های آزمایشگاهی تحقیق Bari (1997) استفاده شده است. آزمایش در یک کانال با دیوار شیشه‌ای انجام شده که به‌وسیله سنگ‌های شکسته پر شده است. مدل فیزیکی سنگریزه‌ای طول ۱/۸ متر، عرض ۰/۳۱ متر، ارتفاع ۰/۴۵ متر وشیب طولی ۰/۰۱۶۷ دارد. این مدل در شکل ۲ نشان داده شده است.

در تحلیل عدم قطعیت Bari برای محاسبات پروفیل سطح آب در این سازه سنگریزه‌ای، پارامترهای دارای عدم‌قطعیت، اندازه میانگین هارمونیک مصالح (d)، فاکتور اصطکاک در ناحیه آشفته (K_t)، راندمان نسبی سطح ذرات (r_e) و دبی (Q) می‌باشند که متغیرهای تصادفی درنظر گرفته شدند. در این راستا، ۱۰۰ نمونه از مصالح تشکیل دهنده سازه سنگریزه‌ای برای محاسبه خصوصیات آماری d درنظر گرفته شد. برای محاسبه دبی از چهار روش استفاده شد که عدم‌قطعیت موجود در اندازه‌گیری دبی به‌وسیله مقادیر حاصله از این چهار روش سنجیده شد. Bari به ازای هر مقدار دبی، یک مقدار برای K_t و r_e در فرایند واسنجی این پارامترها با استفاده از مقایسهٔ اطلاعات آزمایشگاهی سطح آب با پروفیل‌های محاسباتی، به‌دست آورد. در نتیجه، برای هر کدام از این پارامترها چهار مقدار به‌دست آمد که با استفاده از آنها مقادیر میانگین و انحراف معیار این پارامترها محاسبه شدند. Bari در تحقیق خود، تخلخل (n) را به عنوان پارامتر قطعی درنظر گرفت و تخلخل محاسبه شده برای کل سازه سنگریزه‌ای را به‌عنوان مقدار میانگین منظور نمود.



شکل ۲ کانال مورد استفاده در تحقیق Bari برای محاسبه پروفیل سطح آب در سازه سنگریزه‌ای (Bari, 1997)

اما با توجه به ماهیت غیرقطعی و تصادفی تخلخل وتغییرات آن در اعماق و مقاطع مختلف، در تحقیق حاضر، این پارامتر نیز به عنوان یک پارامتر غیرقطعی به محاسبات اعمال شد و ضریب تغییرات آن با توجه به تحقیقات گذشته (حسینی و جهانگیری، ۱۳۸۱، ۱۳۹۰) برابر پنج درصد در نظر گرفته شد. مشخصات آماری متغیرهای تصادفی در جدول ۱ مشاهده می‌شوند.

جدول ۱ خصوصیات آماری پارامترهای تصادفی در تحقیق Bari (1997)

K_t	r_e	Q(L/s)	n	d (mm)	
۳/۱۰	۱/۱۰	۲/۳۹	۰/۴۹	۲۱/۴۸	میانگین
۸/۱۲	۷/۴۲	۱۱/۷۴	۰/۰۰	۲۰/۷۷	ضریب

در ادامه، نحوه تولید داده‌های فازی ورودی، که مربوط به پارامترهای K_t و r_e می‌باشند، توضیح داده می‌شود که اساس کار جدید و متفاوت ارائه‌شده در این تحقیق است. پارامترهای K_t و r_e، توسط افراد کارشناس تعیین می‌شوند و مقادیر آنها به قضاوت مهندسی متخصصان فن بستگی دارند و با دانش فعلی قابل اندازه‌گیری و نمونه-برداری نیستند. همچنین، به‌صورت معمول، تعداد اطلاعات برای این دو پارامتر نادقیق در شرایط عملی اندک است. به همین دلایل، این پارامترها دارای ماهیت فازی بوده و در اساس بایستی توسط اعداد فازی تعریف شوند. به‌عبارت دیگر، نکتهٔ اصلی این است که در عمل برای یک سازه سنگریزه‌ای امکان واسنجی پارامترهای K_t و r_e بر اساس نمونه‌گیری در دبی‌های مختلف (نظیر کار Bari (1997)) در شرایط طراحی وجود ندارد و قضاوت مهندسی کارگشا می‌باشد. اشکال دیگر بر کار Bari این است که این محقق در واسنجی خود، خطا دراندازه‌گیری دبی به روش‌های مختلف را به مشخصات فیزیکی محیط مرتبط کرده است. در تحقیق حاضر، این پارامترها به‌صورت متغیرهای فازی در نظر گرفته شده‌اند و بقیه پارامترها به‌صورت متغیر تصادفی منظور شده‌اند. مقادیر K_t و r_e با توجه به شکل مصالح که در شکل ۳ مشاهده می‌شوند، توسط ده کارشناس برآورد شدند که این مقادیر در جدول ۲ مشاهده می‌شوند.

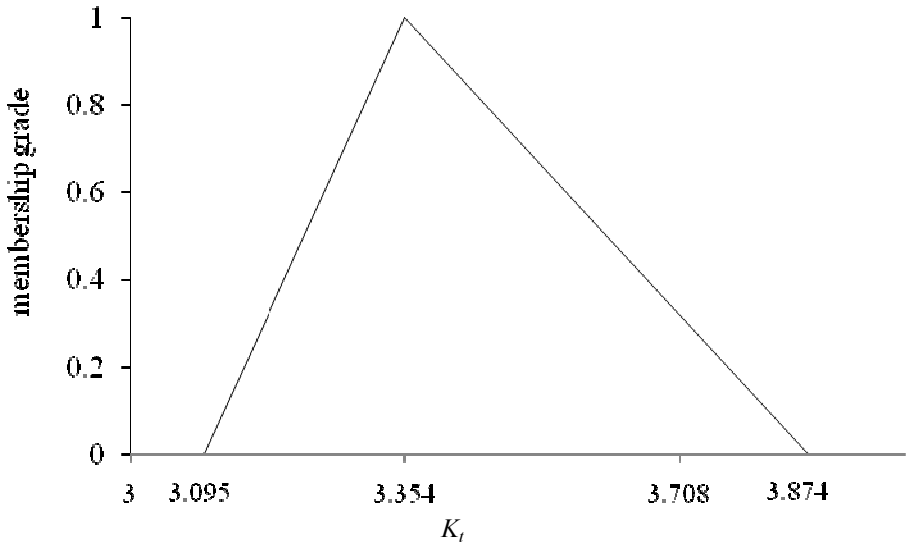
با استفاده از مقادیر برآورد شده برای K_t و r_e توسط کارشناسان، برای این پارامترها توابع عضویت تعریف شد. این فرآیند روند خاص خود را دارد که در ادامه توضیح داده می‌شود. برای این منظور، نمودار ستونی با استفاده از مقادیر هر پارامتر رسم می‌شود. ابتدا کل مجموعه به زیربازه‌هایی تقسیم شده و بر اساس آن نمودار ستونی رسم می‌شود. انتخاب زیربازه‌ها بر این اساس است که در نهایت تابع عضویت دارای کوچکترین تکیه‌گاه باشد و همچنین، ابتدا نمودار به‌صورت صعودی و سپس نزولی باشد یعنی شکلی مشابه تابع عضویت داشته باشد و خصوصیات اعداد فازی را دارا باشد.

شکل ۳ نمونه‌ای از مصالح مورد استفاده در آزمایش (Bari, 1997)

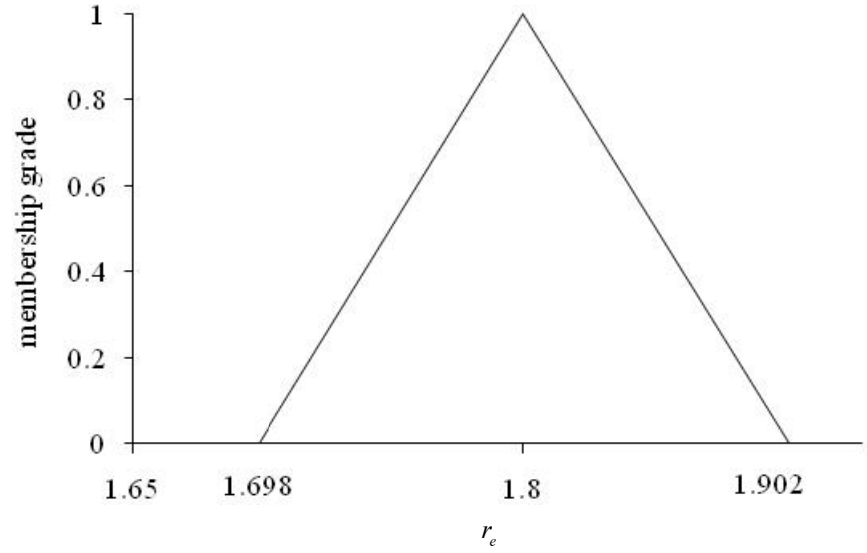
جدول ۲ نظرات کارشناسان در مورد مقادیر پارامترهایی که متغیر فازی منظور شده‌اند

K_t	۳/۴۲	۳/۲۵	۳/۱۴	۳/۴۶	۳/۴۱	۳/۵	۳/۵۵	۳/۳۲	۳/۴	۳/۳۷
r_e	۱/۸	۱/۷۵	۱/۷۲	۱/۸۴	۱/۸۱	۱/۸۵	۱/۸۷	۱/۷۷	۱/۸	۱/۷۹

در نتیجه، انتخاب بازه‌ها برای رسیدن به تابع عضویت مطلوب، یک فرایند تکراری می‌باشد. بعد از تشکیل نمودار ستونی، از روش کمترین مربعات برای تشکیل تابع عضویت استفاده می‌شود (Moller and Beer, 2005). توابع عضویتی که به این روش برای K_t و r_e به دست آمدند، در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده‌اند.گرچه در فرایند معرفی شده، با استفاده از نظرات کارشناسان مختلف، اعداد فازی نشان داده شده در شکل‌های ۳ و ۴ ایجاد شد، ولی، حتی در صورت عدم وجود نظرات کارشناسان مختلف، طراح می‌تواند با قضاوت مهندسی خود به‌تنهایی برای این پارامترها توابع عضویت مناسب پیشنهاد نموده و در محاسبات منظور کند.



شکل ۴ تابع عضویت K_t



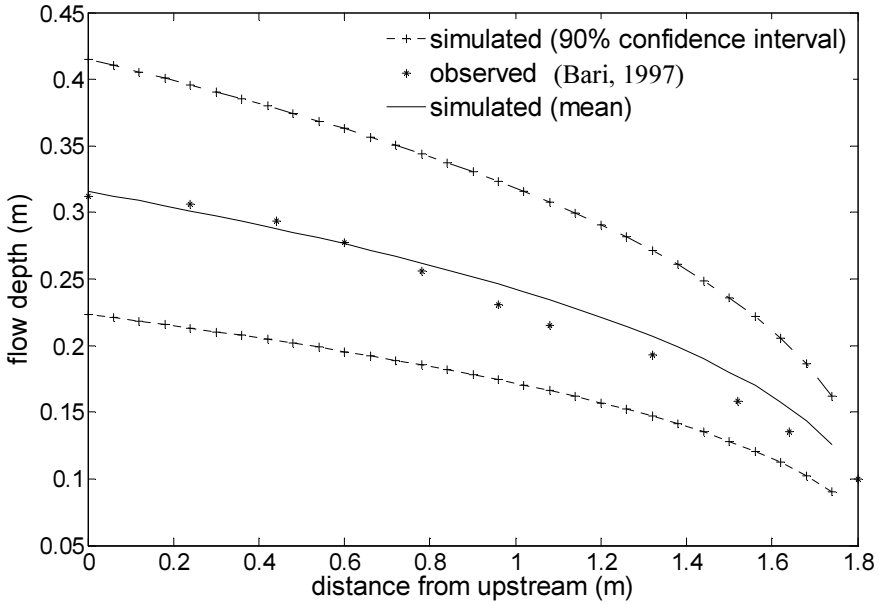
شکل ۵ تابع عضویت r_e

لازم به توضیح است که در تحقیق حاضر، پارامترهای Q و d به‌صورت متغیرهای تصادفی با مشخصات آماری بیان شده در جدول ۱، درنظر گرفته شده‌اند و فقط برای تخلخل (n) همان مقدار میانگین جدول، ولی با ضریب تغییرات ۵٪ استفاده شد.

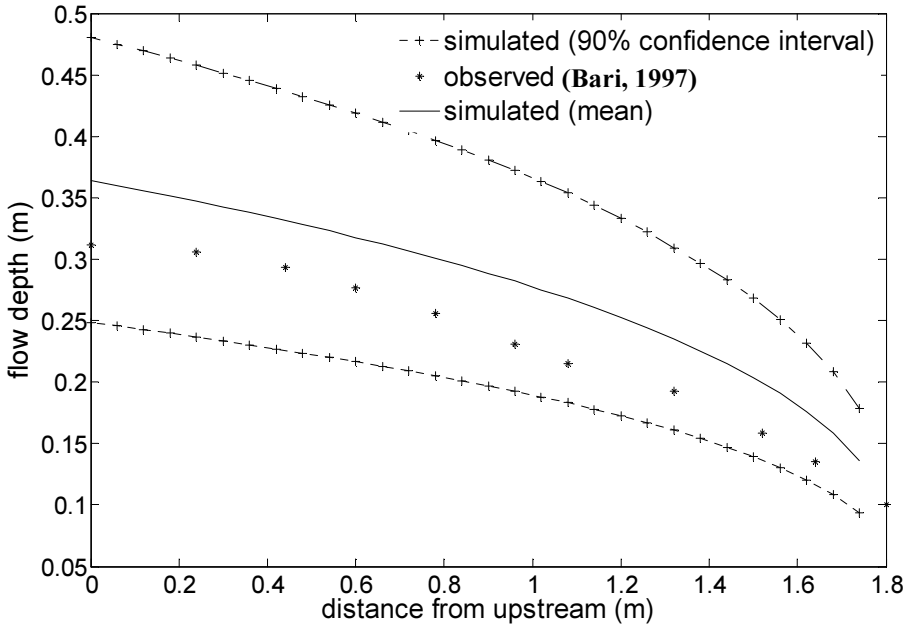
۳- تجزیه و تحلیل نتایج

در این بخش، پروفیل سطح آب محاسبه شده به ازای میانگین مقادیر پارامترهای فیزیکی به همراه نتایج روش ترکیبی تحلیل عدم‌قطعیت پروفیل سطح آب در سازه سنگریزه‌ای ارائه می‌شوند. در کلیه پروفیل‌های محاسباتی، طول هر بازه محاسباتی در روش گام به گام، ثابت و برابر۶ سانتی‌متر انتخاب شد. این طول دقت لازم در محاسبات را ارضا می‌نماید. در اجرای کلیه سناریوها شرط مرزی پایین-دست ثابت و عمق آب برابر ۰/۱ متر می‌باشد.

در شکل‌های ۶ و ۷ نتایج تحلیل عدم‌قطعیت پروفیل سطح آب در سازه سنگریزه‌ای به‌ترتیب برای دو معادله Stephenson و Wilkins در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی ارائه شده‌اند. نتایج آزمایشگاهی از تحقیق Bari (1997) برداشت شده‌اند. در شکل‌های مذکور، محدوده تغییرات برای هر دو معادله، مشابه تحقیق Bari در سطح اطمینان ۹۰٪ رسم شده‌اند. با توجه به اینکه خروجی تحلیل، متغیر فازی تصادفی می‌باشد، برای تعریف سطح اطمینان در اعداد فازی از رابطه بین برش α و فاصله اطمینان استفاده شده است. برش α در اعداد فازی معادل سطح اطمینان $(1-\alpha)\%$ در توابع توزیع می‌باشد که این قضیه از اصل تبدیل قابل برداشت است (Guyonnet et al., 2003). متغیر فازی تصادفی خروجی که یک عدد فازی می‌باشد، با سطح اطمینان ۹۵٪ به‌دست آمده است، یعنی اعداد فازی در هر مقطع با سطح اطمینان ۹۵٪ از متغیر فازی تصادفی استخراج شده‌اند. هر چه میزان سطح اطمینان در محاسبه اعداد فازی بیشتر باشد، دقت نتایج نیز افزایش می‌یابد، به‌طوری که در تحقیق حاضر، انتخاب سطح اطمینان ۹۵٪ برای محاسبه اعداد فازی، نتایج مطلوبی را ارائه می‌دهد. در هر دو شکل مذکور، نتایج حاصل از شبیه‌سازی با مقادیر واقعی مشاهده شده در آزمایشگاه مقایسه شده‌اند.



شکل ۶ پروفیل سطح آب در مدل آزمایشگاهی سنگریزه‌ای با استفاده از معادله Stephenson

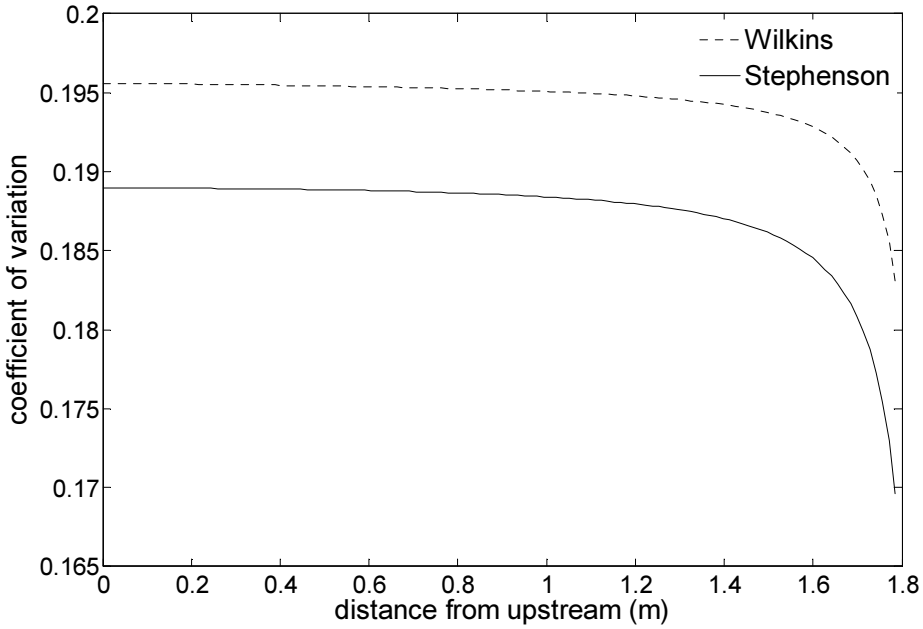


شکل ۷ پروفیل سطح آب در مدل آزمایشگاهی سنگریزه‌ای با استفاده از معادله Wilkins

همان طور که در شکل‌ها مشاهده می‌شود، نتایج آزمایشگاهی در فاصله اطمینان حاصل از تحلیل عدم‌قطعیت برای هر دو معادله قرار گرفته‌اند، اما نتایج آزمایشگاهی با مقادیر میانگین عمق آب حاصل از معادله Stephenson تطابق مناسب‌تری دارند. در واقع مقادیر میانگین حاصل از معادله Wilkins، دست بالا می‌باشند و نتایج معادله Stephenson با واقعیت تطابق بیشتری دارند. اما در تحقیق Bari (1997) با توجه به اینکه شیوه برآورد پارامترهای K_t و r_e بر پایه واسنجی این پارامترها می‌باشد، مقادیر حاصله منجر به نزدیکی مقادیر میانگین پروفیل سطح آب با مقادیر مشاهداتی آزمایشگاهی برای هر دو معادله Stephenson و Wilkins شده است.

همچنین، در شکل ۸، ضریب تغییرات عمق آب در سازه سنگریزه‌ای برای دو معادله Wilkins و Stephenson با یکدیگر مقایسه شده‌اند. برای مقایسه عدم‌قطعیت حاصل از دو معادله، از ضریب تغییرات استفاده شده است. برای تعریف ضریب تغییرات در اعداد فازی از اصل تبدیل استفاده شده است.

همان طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، عدم‌قطعیت عمق آب با استفاده از معادله Stephenson کمتر از معادله Wilkins می‌باشد. با توجه به اینکه تمام پارامترهای دارای عدم‌قطعیت به‌غیر از پارامترهای فازی (K_t و r_e) در دومعادله یکسان می‌باشند، ضریب تغییرات مقادیر پارامترهای فازی برآورد شده در معادلات Stephenson و Wilkins، تأثیر زیادی در عدم‌قطعیت اعماق آب محاسبه شده، دارند. اگر چه این دو پارامتر ماهیت مشابهی دارند، اما برآورد مستقل آنها و نیز نقش و نحوه دخالت کلیه پارامترهای در معرض عدم‌قطعیت در ساختار ریاضی معادلات، می‌تواند دامنه عدم‌قطعیت هر یک از دو معادله Stephenson و Wilkins را تحت تاثیر قرار دهد. آنچه از این تحقیق نتیجه می‌شود این است که اگر در برآورد پارامترهای K_t و r_e ماهیت یکسان و یا به عبارتی تناسب بین این دو پارامتر در نظر گرفته شود، می‌توان انتظار داشت که در مجموع معادله Stephenson عدم‌قطعیت کمتری را نشان دهد. اما نتایج تحقیق Bari (1997) با توجه به نحوه تخمین مذکور برای پارامترهای K_t و r_e، نشان می‌دهد که عدم‌قطعیت حاصل از دو معادله Stephenson و Wilkins تقریباً یکسان است.



شکل ۸ ضریب تغییرات عمق آب در معادلات Wilkins و Stephenson

٤- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، برای محاسبه پروفیل سطح آب در یک تودهٔ سنگریزه‌ای آزمایشگاهی از دو معادله Stephenson و Wilkins استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد که پروفیل سطح آب محاسبه شده با استفاده از معادله Stephenson مطابقت بیشتری با نتایج آزمایشگاهی دارد که خود تأییدی بر مطالعات قبلی است. برای تحلیل عدم‌قطعیت، پارامترهای اندازه میانگین مصالح، تخلخل و دبی به عنوان متغیر تصادفی در نظر گرفته شدند، ولی پارامترهای K_t و r_e، با توجه به این که بر اساس قضاوت مهندسی کارشناسان به تعداد محدود برآورد می‌شوند، دارای ماهیت فازی می‌باشند و بر اساس اعداد فازی تعریف شدند. در نتیجه، برای تحلیل عدم‌قطعیت از روش ترکیبی استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد که علاوه بر نقش هر پارامتر در ساختار ریاضی معادلات، عدم‌قطعیت خروجی (عمق جریان) در معادلات Stephenson و Wilkins، وابستگی زیادی به مقادیر K_t و r_e برآورد شده توسط کارشناسان دارد. در صورتی که این پارامترها به صورت صحیح برآورد شوند، یعنی با توجه به ماهیت یکسان آنها تناسب بین مقادیرشان حفظ شود، عدم‌قطعیت خروجی معادله Stephenson کمتر خواهد بود.

٥- فهرست علایم

A	سطح مقطع جریان
CV	ضریب تغییرات
d	اندازه میانگین هارمونیک مصالح
e	نسبت تخلخل
g	شتاب جاذبه زمین
i	گرادیان هیدرولیکی
K_t	فاکتور اصطکاک در ناحیه جریان آشفته
m	شعاع هیدرولیکی منفذی
n	تخلخل
Q	دبی جریان
r_e	راندمان نسبی سطح ذرات
s_0	ضریب حساسیت
S_0	شیب طولی مسیر
T	عرض سطح آزاد آب

میانگین یک متغیر تصادفی	μ
میزان درجه عضویت x به مجموعه فازی A	$\mu_A(x)$
لزجت جنبشی سیال	ν
سرعت جریان	V
مقدار ثابت معادله Wilkins	W
عمق آب	y
انحراف معیار	σ

٦- منابع

حسینی، س. م. و ابریشمی، ج. (۱۳۸۹)، *هیدرولیک کانالهای باز*، چاپ بیست و هفتم، انتشارات آستان قدس رضوی، مشهد.

حسینی، س. م. و جهانگیری، م. (۱۳۹۰)، "تجزیه و تحلیل عدم قطعیت وحساسیت روابط برآورد عامل‌های هیدرولیکی جریان در محیط سنگریزه"، مجله علمی- پژوهشی علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، ۵ (۱۴)، ص‌ص. ۶۱-۷۰.

حسینی، س.م. و جهانگیری، م. (۱۳۸۱)، "آنالیز عدم اطمینان روابط تخمین پارامترهای هیدرولیکی جریان در محیط سنگریزه،"، گزارش طرح تحقیقاتی ارائه‌شده به سازمان مدیریت منابع آب ایران (قرارداد شماره ش‌پ/۸۰/۱۶۱).

حسینی، س. م. و صنعی، ا. (۱۳۸۲)، "تحلیل جریان از بدنه سدهای سنگریزه‌ای به روش اجزا محدود در قالب شبکه ثابت"، مجله استقلال، ۲۲(۱)، ص‌ص. ۹۱- ۱۰۸.

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.

Bari, R. (1997). "The hydraulics of buried streams", M.Sc. Thesis, Technical University of Nova Scotia, Canada.

Bari, R and Hansen, D. (2002). "Uncertainty in water surface profile of buried stream flowing undercoarse material", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 128(8), pp.. 761-773.

Bari, R. and Hansen. D. (2003), "Application of gradually-varied flow algorithms to simulate buried streams", Journal of Hydraulic Research, IAHR, 40(6), pp. 673-683.

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.

CIRIA, CUR, CETMEF (2007). "The rock manual: the use of rock in hydraulic engineering", 2nd edition, C683, CIRIA, London.

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(7), pp. 1-18.

Faybishenko, B. (2010). "Fuzzy-probabilistic calculations of water-balance uncertainty", Journal of Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, Springer, 24(6), pp. 939-952.

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.

Garga, V. K., Hansen, D. and Townsend, D. R. (1989). "Considerations in the design of flow through rockfill drains", Proc. of the 14th Annual British Columbia Mine Reclamation Symposium, June 20-21, Cranbrook, British Columbia.

Greenly, B. T. and Joy, D. M. (1996). "One-dimensional finite element model for high flow velocities in porous media", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 122(10), pp. 789–796.

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.

Guyonnet, D., Bourgine, B., Dubois, D., Fargier, H., Come, B. and Chiles, J. P. (2003). "Hybrid approach for addressing uncertainty in risk assessments", Journal of Environmental Engineering, ASCE, 128(1), pp. 68-78.

Hosseini, S. M. (2000). "Statistical evaluation of the empirical equation that estimate hydraulic parameters for flow through rockfill", in Stochastic Hydraulic 2000, Z. Y. Wang and S. X. Hu (eds.), Balkema, Rotterdam. The Netherlands, pp. 547-552.

Hosseini, S. M. and Joy, D. M., (2006). "Calibration of hydraulic parameters for flow through rockfill structures", Dam Engineering, International Water Power & Dam Construction, 17(2), pp. 85-111.

Hosseini, S. M. and Joy, D. M., (2007).

Parkin, A. K. (1991). "Through and overflow rockfill dams", in Advances in Rockfill Structures, E. Maranha das Neves (ed.), Kluver Academic Publishers, The Netherlands, pp. 571–592.

Revelli, R. and Ridolfi, L. (2003). "Fuzzy approach for analysis of pipe networks", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 128(1), pp. 93–101.

Ross, T. J. (2010), "Fuzzy logic with engineering applications", 3rd Edition, Wiley, England.

Samani H. M. V., Samani, J. M. V. and Shaiannejad, M. (2003). "Reservoir routing using steady and unsteady flow through rockfill dams", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 129(6), pp. 448-454.

Stephenson, D. (1978). "Hydraulics of gabions and rockfill", Proc. of XVI Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Torino, Italy, pp. B31-1–B31-11.

Stephenson, D. (1979). "Rockfill in hydraulic engineering: developments in geotechnical engineering 27", 1st Edition, Elsevier Scientific Publishing Co., Amsterdam, The Netherlands.

Townsend, R. D., Garga, V. K. and Hansen, D., (1991). "Finite difference modeling of the variation of piezometric head within a rockfill embankment", Canadian Journal of Civil Engineering, NRC Research Press., 18(2), pp. 254-263.

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, The Netherlands, pp. 29-46.

Volker, E., (1969)."Nonlinear flow in porous media by finite elements", Journal of Hydraulics Division, ASCE, 95(6), pp. 2093-2114.

Volker, E., (1975). "Solutions for unconfined non-Darcy seepage", Journal of Irrigation and Drainage Division, ASCE, 101(I1), pp. 53-65.

Ye, M., Pohlmann, K. F., Chapman, J. B., Pohll, G. M. and Reeves, D. M. (2009). "A model-averaging method for assessing groundwater conceptual model uncertainty", Ground Water, National Ground Water Association, 48(5), pp. 716-728.

Yen, B. C and Tung, Y. K. (1993). "Some recent progress in uncertainty analysis for hydraulic design", in Reliability and Uncertainty Analysis in Hydraulic Design, B. C. Yen and Y. K. Tung, eds., ASCE Publications, USA, pp. 17-34.

Zadeh, L. A. (1965). "Fuzzy sets", Information and Control, 8(3), pp. 338-353.

Zhang, K. and Achari, G. (2010). "Correlation "Development of an unsteady model for flow through coarse heterogeneous porous media applicable to valley fills", International Journal of River Basin Management, IAHR, 5(4), pp. 253-265.

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.

Kang, D. and Lansey, K. (2010). "Demand and roughness estimation in water distribution systems", Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, 137(1), pp. 20-30.

Kang, D., Pasha, M. F. K. and Lansey, K. (2009). "Approximate methods for uncertainty analysis of water distribution systems", Urban Water Journal, Taylor & Francis, 6(3), pp. 233-249.

Kells, J. A., (1993). "Spatially varied flow over rockfill embankments", Canadian Journal of Civil Engineering, NRC Research Press., 20(5), pp. 820-827.

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.

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.

Leps, T. M. (1973). "Flow through rockfill", in Embankment Dam Engineering, R. Hirchfeld and S. Poulos (eds.), John-Wiley & Sons, New York, pp. 87-97.

Li, H. and Zhang, K. (2010). "Development of a fuzzy-stochastic nonlinear model to incorporate aleatoric and epistemic uncertainty", Journal of Contaminant Hydrology, Elsevier B.V., 111(4), pp. 1-12.

McCorquodale, J. A., (1970). "Variational approach to non-Darcy flow", Journal of Hydraulics Division, ASCE, 96(11), pp. 2265-2278.

Moller, B. and Beer, M. (2005). "Fuzzy randomness, uncertainty in civil engineering and computational mechanics", 1st Edition, Springer, Germany.

Mpimpas, H., Anagnostopoulos, P. and Ganoulis, J. (2008). "Uncertainty of model parameters in stream pollution using fuzzy arithmetic", Journal of Hydroinformatics, IWA, 10(3), pp. 189-200.

between uncertainty theories and their application in uncertainty propagation", The Proc. of the 10th International Conference on Structure Safety and Reliability, September 13-17, Osaka, Japan.

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, Elsevier B.V., 110(1-2), pp. 45–59.