

ارزیابی روش‌های شبیه‌سازی عددی امواج شوک با استفاده از فرایند تحلیل سلسله مراتبی فازی و غیرفازی

مریم ضیال‌الدینی دشتخاکی^۱
مسعود رضا حسامی کرمانی^{۲*}
مهناز قائینی حصاروئی^۳

چکیده

مسئله شکست سد که در اثر رها شدن ناگهانی حجمی از آب در یک آبراهه اتفاق می‌افتد، شامل امواج شوک و انبساطی است و می‌تواند باعث ایجاد خسارات مالی و جانی شود. در میان روش‌های مختلف ارائه‌شده برای مدل‌سازی عددی این امواج، در سال‌های اخیر روش حجم محدود مبتنی بر معادلات آب کم‌عمق با توانایی مدل‌سازی امواج شوک، به‌عنوان روشی پیشرو مورد استقبال محققین قرار گرفته است. دلیل این امر توانایی بالای این روش در مدل‌سازی انواع جریان‌های فوق بحرانی، زیر بحرانی، دائمی، غیردائمی، پیوسته و ناپیوسته است. در تحقیق حاضر عملکرد پنج روش از روش‌های پرکاربرد ارائه‌شده توسط محققین که مهم‌ترین حل‌کننده‌های تقریبی مسئله ریمان به شمار می‌روند با توجه به معیارهای دقت، زمان شبیه‌سازی، سهولت اجرا، قابلیت کاربرد و پایداری مورد بررسی قرار گرفته و سپس با استفاده از فرایند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و فرایند تحلیل سلسله مراتبی فازی (FAHP) روش بهینه معرفی شده است. نتایج هر دو روش AHP و FAHP نشان‌دهنده برتری روش Osher نسبت به سایر گزینه‌هاست. سپس روش‌های HLLC و FVS با اختلاف کمی در رتبه بعد قرار می‌گیرند و در نهایت روش‌های HLL و REF در اولویت‌های چهارم و پنجم قرار دارند.

واژه‌های کلیدی:

تحلیل سلسله مراتبی، تحلیل سلسله مراتبی فازی، امواج شوک، حل‌کننده‌های تقریبی ریمان، بهینه‌سازی

۱. دانشجوی دکتری بخش مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان.

۲. دانشیار بخش مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان. Hessami@uk.ac.ir

۳. دانشیار بخش مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان.

مقدمه

جمله این روش‌هاست که بر پایه مقایسه زوجی بر اساس معیارها استوار است. این روش جهت استفاده از منطق فازی نیز توسعه یافته و روش فرایند تحلیل سلسله مراتبی فازی^{۱۲} (FAHP) نامیده می‌شود. نظریه فازی تلاش می‌کند که ابهام و عدم قطعیت‌های ذاتی موجود در ترجیح‌ها، هدف‌ها و محدودیت‌های موجود در مسائل تصمیم‌گیری را برطرف کند. تاکنون پژوهش‌های مختلفی در زمینه استفاده از فرایند سلسله مراتبی توسط محققین انجام شده است. طیبی و همکاران^{۱۳} در سال ۱۳۹۵ با استفاده از فرایند سلسله مراتبی فازی دلایل تخریب سدهای خاکی را شناسایی و رتبه‌بندی کردند. این روش توسط مومزایی و همکاران^{۱۴} در سال ۱۳۹۷ برای مکان یابی سد زیرزمینی مورد استفاده قرار گرفت. نوری و همکاران^{۱۵} در سال ۱۳۹۸ به مطالعه حساسیت وقوع سیل و تهیه نقشه محل‌های حساس به سیل با استفاده از تحلیل سلسله مراتبی AHP و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) پرداختند. توانایی روش‌های عددی مختلف مدل‌سازی امواج شوک و انبساطی ناشی از شکست سد توسط محققین مورد بررسی قرار گرفته است (اردوران و همکاران، ۲۰۰۲؛ زپو و روبرتز^{۱۶}، ۲۰۰۴). در این تحقیق بررسی تمامی معیارهای مهم در روش‌های عددی به صورت یک مسئله تصمیم‌گیری چند هدفه به منظور یافتن و ارائه یک روش بهینه صورت پذیرفته است. در تحقیق حاضر با توجه به پنج معیار مهم ارزیابی روش‌های عددی شامل، دقت، زمان شبیه‌سازی، سهولت اجرا، قابلیت کاربرد و پایداری، عملکرد پنج حل‌کننده ریمان شامل: HLL، Osher، FVS و REF جهت حل معادلات آب‌های کم‌عمق به روش حجم محدود ارزیابی می‌شود.

شکست سد در دهه‌های اخیر باعث ایجاد آسیب‌های جانی و خرابی‌های وسیع فعالیت‌های زیربنایی و اقتصادی در مناطق مختلف دنیا شده است، بنابراین بررسی این پدیده به‌عنوان یکی از مسائل پراهمیت در مهندسی هیدرولیک محسوب می‌شود. جهت مدل‌سازی جریان‌های ناماندگار با سطح آزاد، نظیر امواج ناشی از شکست سد، می‌توان از معادلات آب کم‌عمق^۱ استفاده کرد. خصلت غیرخطی بودن این معادلات سبب می‌شود حل آن‌ها به تعدادی حالت خاص محدود گردد. بنابراین برای حل مسائل کاربردی که در آن‌ها ناپیوستگی در حل وجود دارد، بایستی از روش‌های عددی استفاده کرد (زپو و روبرتز^۲، ۲۰۰۳). انواع مختلفی از روش‌های حل تقریبی مسئله ریمان پیشنهاد شده است که نسبت به حل دقیق مسئله ریمان هزینه محاسباتی کمتری دارند. روش‌هایی مانند HLL^۳، HLLC^۴، Osher^۵ و FVS^۶ که به‌طور گسترده توسط محققین استفاده می‌شوند (کائو و همکاران^۷، ۲۰۱۵؛ ژو و ژان^۸، ۲۰۱۶؛ حسین زاده و قائینی^۹، ۲۰۱۸). از ویژگی‌های مهم روش‌های عددی می‌توان به پنج فاکتور دقت، زمان شبیه‌سازی، سهولت اجرا، قابلیت کاربرد برای مسائل مختلف و پایداری اشاره کرد (اردوران و همکاران^{۱۰}، ۲۰۰۲). جهت ارزیابی روش‌های عددی بر اساس معیارهای مذکور از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره و روش‌های تصمیم‌گیری توسعه یافته با منطق فازی می‌توان بهره جست. با توجه به وجود چند هدف در این گونه مسائل، می‌توان از فرایندهای سلسله مراتبی که چندین معیار را با توجه به وزن هر معیار در تصمیم‌گیری دخالت می‌دهند، استفاده کرد. روش فرایند تحلیل سلسله مراتبی^{۱۱} (AHP) از

¹⁰ Erduran et al.

¹¹ Analytical Hierarchy Process

¹² Fuzzy Analytical Hierarchy process

¹³ Tayebi et al.

¹⁴ Mumzaei et al.

¹⁵ Nuri et al.

¹⁶ Zoppou and Roberts

¹ Shallow water equations

² Zoppou and Roberts

³ Harten-Lax-van Leer

⁴ Harten-Lax-van Leer-Contact

⁵ Flux Vector Splitting

⁶ Roe with Entropy Fixed

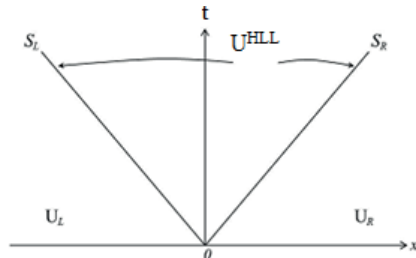
⁷ Cao et al.

⁸ Zhou and Zhan

⁹ Hosseinzadeh and Ghaeini-Hessaroeyeh

روش HLL

روش HLL برای اولین بار در سال ۱۹۸۳ توسط هارتن و همکاران^۳ معرفی شد. ساختار موج در نظر گرفته شده برای این روش مطابق شکل (۱) است.



شکل (۱): ساختار امواج در روش HLL

مراحل حل با روش HLL به صورت زیر خلاصه می‌گردد:

- بدست آوردن مقادیر اولیه برای وجوه سمت چپ و راست هر سلول با محاسبه سرعت‌ها انتقالی u_L و u_R برای وجه چپ و h_L و h_R برای وجه سمت راست.

- محاسبه حداقل و حداکثر سرعت:

$$\begin{aligned} S_R &= \max(u_R + \sqrt{gh_R}, u^* + h^*) \\ S_L &= \min(u_L - \sqrt{gh_L}, u^* - h^*) \\ u^* &= \frac{u_L + u_R}{2} + \sqrt{gh_L} - \sqrt{gh_R} \\ h^* &= \frac{u_L - u_R}{4} + \frac{\sqrt{gh_L} + \sqrt{gh_R}}{2} \end{aligned} \quad (۴)$$

- محاسبه فلاکس عبوری از وجوه سلول:

$$F = \begin{cases} F_L & \text{if } S_L \geq 0 \\ F_R & \text{if } S_R \leq 0 \\ F^* & \text{if otherwise} \end{cases} \quad (۵)$$

روش HLLC

روش HLLC در سال ۱۹۹۴ توسط تورو و همکاران^۴ ارائه شد. ساختار امواج برای روش HLLC در شکل (۲) نشان داده شده است. همانطور که در شکل نیز مشهود است، دو فلاکس متمایز برای منطقه ستاره‌دار در مقایسه با ساختار HLL موجود است.

مواد و روش‌ها

معادلات حاکم

معادلات آب‌های کم‌عمق در حالت دوبعدی به صورت زیر بیان می‌شوند (اردوران و همکاران، ۲۰۰۲):

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial F_x}{\partial x} + \frac{\partial F_y}{\partial y} = S_0 + S_f \quad (۱)$$

Q نشان‌دهنده‌ی متغیرهای بقایی^۱ و F_x و F_y شارهای انتقالی^۲ در راستای x و y هستند، S_0 شیب بستر و S_f اصطکاک بستر است. همچنین مقادیر Q، F_x و F_y به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$Q = \begin{pmatrix} h \\ hu \\ hv \end{pmatrix}, F_x = \begin{pmatrix} hu \\ hu^2 + \frac{gh^2}{2} \\ hvu \end{pmatrix}, F_y = \begin{pmatrix} hv \\ huv \\ hv^2 + \frac{gh^2}{2} \end{pmatrix} \quad (۲)$$

در رابطه‌ی بالا h عمق جریان، u و v به ترتیب سرعت‌های متوسط گیری شده در عمق در راستای x و y و g نشان‌دهنده شتاب ثقل است. از طرفی شیب بستر و اصطکاک بستر به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$S_0 = \begin{pmatrix} 0 \\ -gh \frac{\partial b}{\partial x} \\ -gh \frac{\partial b}{\partial y} \end{pmatrix}, S_f = \begin{pmatrix} 0 \\ -C_f u \sqrt{u^2 + v^2} \\ -C_f v \sqrt{u^2 + v^2} \end{pmatrix} \quad (۳)$$

است. $C_f = \frac{gn_m^2}{h^{1/3}}$ ضریب اصطکاک بستر و n_m ضریب مانینگ

حل‌کننده‌های تقریبی ریمان

حل‌کننده‌های تقریبی مسئله ریمان بررسی شده در تحقیق حاضر، شامل روش‌های HLL، HLLC، Osher، FVS و REF می‌باشند. در ادامه به اختصار به شرح هر کدام از روش‌ها پرداخته شده است.

³ Harten et al.

⁴ Toro et al.

¹ conservative variables

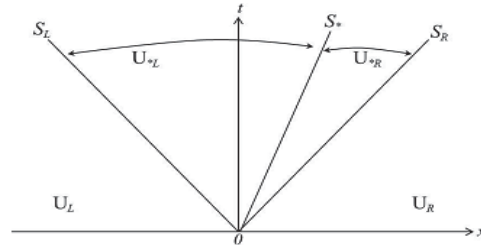
² advective fluxes

۷۵..... ارزیابی روش‌های شبیه‌سازی عددی امواج شوک با استفاده از فرایند تحلیل سلسله مراتبی فازی و غیرفازی

علاوه بر تخمین تقریبی سرعت موج در حل HLL اکنون باید فلاکس عددی به روش HLLC از روابط زیر به دست می‌آید:

$$F = \begin{cases} F_L & \text{if } 0 \leq S_L \\ F_{*L} = F_L + S_L(U_{*L} - U_L) & \text{if } S_L \leq 0 \leq S_* \\ F_{*R} = F_R + S_R(U_{*R} - U_R) & \text{if } S_* \leq 0 \leq S_R \\ F_R & \text{if } S_R \leq 0 \end{cases}$$

سرعت برای موج میانی نیز تخمین زده شود.



شکل (۲): ساختار امواج در روش HLLC

$$U_{*k} = h_k \left(\frac{S_k - u_k}{S_k - S_*} \right) \begin{bmatrix} 1 \\ S_* \end{bmatrix} \quad k=L,R \quad (۶)$$

$$S_* = \frac{S_L h_R (u_R - S_R) - S_R h_L (u_L - S_L)}{h_R (u_R - S_R) - h_L (u_L - S_L)}$$

جدول (۱): تخمین فلاکس عبوری از وجوه سلول در روش Osher

شرایط هیدرولیکی	$u_L - c_L \geq 0$ $u_R + c_R \geq 0$	$u_L - c_L \geq 0$ $u_R + c_R \leq 0$	$u_L - c_L \leq 0$ $u_R + c_R \geq 0$	$u_L - c_L \leq 0$ $u_R + c_R \leq 0$
$u_A \geq 0$ $u_A - c_A \geq 0$	F_L	$F_L + F_R - F_{s3}$	F_{s1}	$F_{s1} - F_{s3} + F_R$
$u_A \geq 0$ $u_A - c_A \leq 0$	$F_L - F_{s1} + F_A$	$F_L - F_{s1} + F_A + F_R - F_{s3}$	F_A	$F_R + F_A - F_{s3}$
$u_B \leq 0$ $u_B + c_B \geq 0$	$F_L - F_{s1} + F_B$	$F_L - F_{s1} + F_B - F_R - F_{s3}$	F_B	$F_R + F_B - F_{s3}$
$u_B \leq 0$ $u_B + c_B \leq 0$	$F_L - F_{s1} + F_{s3}$	$F_L - F_{s1} + F_R$	F_{s3}	F_R

$$c_L = \sqrt{gh_L}, \quad c_R = \sqrt{gh_R},$$

$$\Psi_L = u_L + 2c_L, \quad \Psi_R = u_R - 2c_R$$

- محاسبه مقادیر $u_A, v_A, h_A, u_B, v_B, h_B, u_{s1}, v_{s1}, h_{s1}, u_{s3}, v_{s3}, h_{s3}$

$$:v_{s3} \text{ و } v_{s1}, h_{s3}, u_{s3}, h_{s1}, u_{s1}, c_B$$

$$u_A = u_B = \frac{\Psi_L + \Psi_R}{2}, \quad h_A = h_B = \frac{1}{g} \left(\frac{\Psi_L - \Psi_R}{4} \right)^2$$

$$u_{s1} = \frac{1}{3} \Psi_L, \quad h_{s1} = \frac{(u_{s1})^2}{g}$$

$$u_{s3} = \frac{1}{3} \Psi_R, \quad h_{s3} = \frac{(u_{s3})^2}{g}$$

$$v_L = v_A = v_{s1}, \quad v_R = v_B = v_{s3} \quad (۸)$$

- محاسبه مقادیر فلاکس بر اساس جدول (۱).

روش REF

روش Osher

روش Osher در سال ۱۹۹۷ توسط تورو و همکاران^۱ (۷)

معرفی شد. در این روش یک نقطه بحرانی در نظر گرفته می‌شود که این نقطه محل صفر شدن سرعت مشخصه است و هنگامی که علامت سرعت مشخصه موج عوض می‌شود اتفاق می‌افتد. مراحل حل با روش Osher به صورت زیر خلاصه می‌گردد:

- بدست آوردن مقادیر اولیه برای وجوه سمت چپ و راست هر سلول با محاسبه مقادیر u_L, v_L و h_L و برای وجوه چپ و h_R, v_R برای وجه سمت راست.

- محاسبه سرعت‌های موج c_L و c_R و متغیرهای ریمان Ψ_R و

Ψ_L

¹ Toro et al.

- بدست آوردن مقادیر اولیه برای وجوه سمت چپ و راست هر سلول با محاسبه مقادیر u_L, h_L و v_L برای وجه چپ و h_R, h_R و v_R برای وجه سمت راست.

- محاسبه مقادیر ویژه برای وجوه سمت چپ و راست سلول. اگر مقدار ویژه روی وجه چپ بیشتر از صفر باشد، همان مقدار و در غیر اینصورت مقدار صفر اتخاذ می‌گردد. اگر مقدار ویژه روی وجه راست بیشتر از صفر باشد، مقدار صفر و در غیر اینصورت همان مقدار اتخاذ می‌گردد (علامت + و - نشان می‌دهند که مقدار ویژه مثبت است یا منفی).

- محاسبه مقادیر فلاکس از رابطه زیر:

(۱۴)

$$F(L,R) = \frac{h}{4} \begin{bmatrix} 2\lambda_2^+ + \lambda_3^+ + \lambda_1^+ \\ 2\lambda_2^+ u_L + \lambda_3^+ (u_L + c_L) + \lambda_1^+ (u_L - c_L) \\ 2\lambda_2^+ v_L + \lambda_3^+ v_L + \lambda_1^+ v_L \end{bmatrix} + \frac{h}{4} \begin{bmatrix} 2\lambda_2^- + \lambda_3^- + \lambda_1^- \\ 2\lambda_2^- u_R + \lambda_3^- (u_R + c_R) + \lambda_1^- (u_R - c_R) \\ 2\lambda_2^- v_R + \lambda_3^- v_R + \lambda_1^- v_R \end{bmatrix}$$

برای ارزیابی روش‌های مذکور، آزمون‌های مختلفی به شرح زیر انتخاب و قابلیت این روش‌ها بررسی شده است:

- مدل یک بعدی شکست کامل سد: این مسئله اولین بار توسط گارسیا و کاهویتا^۳ در سال ۱۹۸۶ معرفی و سپس توسط محققین دیگر نیز مدل‌سازی شد (ژائو و همکاران^۴، ۱۹۹۶؛ ژائو و همکاران^۵، ۱۹۹۴).

- مدل دو بعدی شکست جزئی سد: یکی از مشهورترین مسائل شکست سد است که توسط محققین مختلف بررسی شده است (ژائو و همکاران، ۱۹۹۶؛ ژائو و همکاران، ۱۹۹۴؛ گلاستر^۶، ۱۹۹۳؛ فنما و چادری^۷، ۱۹۹۰؛ آناستاسی و چان^۸، ۱۹۹۷).

روش Roe در سال ۱۹۸۱ توسط رو^۱ ارائه شد، روش Roe که در بعضی شرایط (بستر خشک) کاربرد مناسبی نداشت و با تصحیح آنتروپی اصلاح شد و با نام REF که دارای قابلیت بالاتری در مدل‌سازی می‌باشد ارائه شد. مراحل حل با روش REF به صورت زیر خلاصه می‌گردد:

- بدست آوردن مقادیر اولیه برای وجوه سمت چپ و راست هر سلول با محاسبه مقادیر u_L, h_L و v_L برای وجه چپ و h_R, h_R و v_R برای وجه سمت راست.

- محاسبه سرعت‌های u' ، v' و c' :

$$u' = \frac{u_R \sqrt{h_R} + u_L \sqrt{h_L}}{\sqrt{h_R} + \sqrt{h_L}} \quad (۹)$$

(۱۰)

$$v' = \frac{v_R \sqrt{h_R} + v_L \sqrt{h_L}}{\sqrt{h_R} + \sqrt{h_L}}$$

(۱۱)

$$c' = \sqrt{\frac{g(h_R + h_L)}{2}}$$

- محاسبه مقادیر λ'_i و α'_i برای $i=1,2,3$:

$$\lambda'_1 = u' - c', \quad \lambda'_2 = u', \quad \lambda'_3 = u' + c'$$

$$\alpha'_1 = \frac{h_R - h_L}{2} + \frac{u'(h_R - h_L) - (h_R u_R - h_L u_L)}{2c'}$$

$$\alpha'_2 = h_R v_R - h_L v_L - v'(h_R - h_L)$$

(۱۲)

$$\alpha'_3 = h_R - h_L - \alpha'_1$$

- محاسبه مقادیر فلاکس از رابطه زیر:

(۱۳)

$$F(L,R) = \frac{1}{2}(F_L + F_R) - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \lambda'_i \alpha'_i \gamma'_i$$

روش FVS

روش FVS در سال ۱۹۸۱ توسط استگر و وارمینگ^۲ معرفی شد. مراحل حل با روش REF به صورت زیر خلاصه می‌گردد:

⁴ Zhao et al., 1994

⁵ Glaister

⁶ Fennema and Chaudhry

⁷ Anastasiou and Chan

² Roe

¹ Steger and Warming

² Garcia and Kahawita

³ Zhao et al., 1996

۷۷..... ارزیابی روش‌های شبیه‌سازی عددی امواج شوک با استفاده از فرایند تحلیل سلسله مراتبی فازی و غیرفازی

معیار C_1 ارجحیت $1/n$ دارد)، اصل همگنی (معیارها مقایسه پذیر باشند)، اصل وابستگی (هر سطح به سطح بالاتر وابسته است)، اصل انتظارات (با تغییر در یک معیار باید کل مراحل سلسله مراتبی مجددا صورت گیرد) می‌شود. مراحل فرایند تحلیل سلسله مراتبی به صورت شماتیک در شکل (۳) نشان داده شده است.

فرایند تحلیل سلسله مراتبی AHP

این روش در دهه ۱۹۷۰ توسط توماس ساعتی معرفی شد (ساعتی^۸، ۱۹۹۷). فرایند سلسله مراتبی کمک می‌کند که تصمیمات مناسب برای موضوعات پیچیده با ساده کردن و هدایت مراحل تصمیم‌گیری اتخاذ شود و در آن یک وضعیت پیچیده به بخش‌های کوچکتر تقسیم شده و سپس این اجزا در ساختاری سلسله مراتبی قرار می‌گیرند. در این روش به قضاوت‌های ذهنی باتوجه به اهمیت هر متغیر، مقادیر عددی اختصاص می‌یابد و متغیرهایی که بیشترین اهمیت را دارند تعیین می‌شوند. بنابراین در این روش تصمیم‌گیری به سطوح مختلف هدف، معیارها و گزینه‌ها تقسیم می‌شود و بر پایه مقایسه زوجی استوار است. مراحل تحلیل سلسله مراتبی شامل گام‌های زیر است:

- گام اول: ایجاد ساختار سلسله مراتبی

جدول (۲): ترجیحات بکار رفته برای وزن دهی نسبی به معیارها در روش AHP

مقیاس	نرخ عددی
ترجیح یکسان	۱
کمی مرجح	۳
خیلی مرجح	۵
خیلی زیاد مرجح	۷
کاملا مرجح	۹
بینابین	۶-۴-۲-۸

- گام دوم:

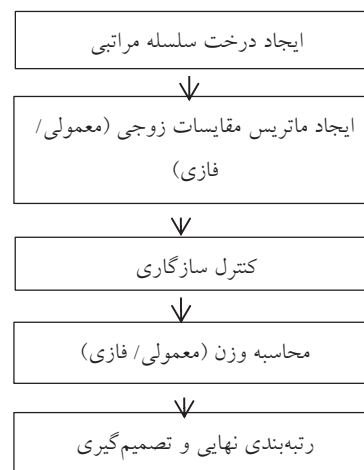
- شکست سد دایره‌ای: شامل یک ستون آب است که به طور ناگهانی فرو ریخته و موج شوک در جهت شعاعی گسترش می‌یابد، این مسئله توسط محققین مختلف بررسی شده است (آناستاسی و چان، ۱۹۹۷؛ مینگام و کاسن^۸، ۱۹۹۸؛ الکرودو و گارسیا-ناوارو^۹، ۱۹۹۳).

- مدل‌سازی شوک عرضی^۳: یک شوک عرضی زمانی اتفاق می‌افتد که یک جریان فوق بحرانی به یک دیواره همگرا برخورد کند. این مسئله توسط محققین مختلف بررسی شده است (ژائو و همکاران، ۱۹۹۶؛ چپادا و همکاران^۴، ۱۹۹۸؛ تسنگ^۵، ۱۹۹۹).

- کانال آبیاری^۶: زیو و رابرتز^۷ در سال ۱۹۹۹ از این مثال برای نشان دادن توانایی مدل‌شان در مدل‌سازی بستر خشک و مرطوب استفاده کردند.

تحلیل سلسله مراتبی

هدف تکنیک فرایند تحلیل سلسله مراتبی انتخاب بهترین گزینه براساس معیارهای مختلف از طریق مقایسه زوجی است.



شکل (۳): نمایش شماتیک مراحل تحلیل سلسله مراتبی

این تکنیک شامل چهار اصل اساسی، اصل معکوس بودن (اگر معیار C_1 بر معیار C_2 ارجحیت n داشته باشد، معیار C_2 به

³ Irrigation Channel

⁴ Zoppou and Roberts

⁵ Saaty

⁸ Mingham and Causon

⁹ Alcrudo F., Garcia-Navarro

¹⁰ Oblique shock

¹ Chippada et al.

² Tseng

تشکیل ماتریس مقایسه زوجی: در این مرحله عناصر هر سطح نسبت به سایر عناصر مربوط در سطح بالاتر به صورت زوجی مقایسه شده و ماتریس‌های مقایسه زوجی تشکیل می‌شوند. جهت تعیین اهمیت و ترجیح در مقایسه زوجی از طیف ۱ تا ۹ ساعتی مطابق جدول (۲) استفاده می‌شود.

- گام سوم: تعیین وزن‌ها با استفاده از روش میانگین هندسی.
- گام چهارم: محاسبه نرخ سازگاری که از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$(۱۵)$$

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

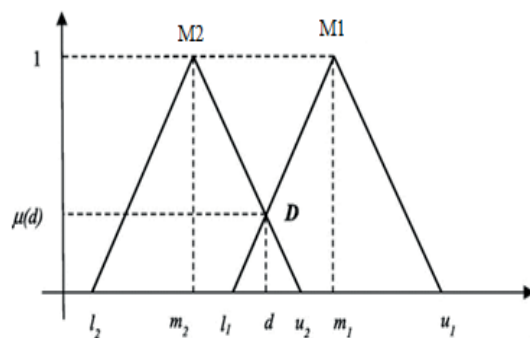
$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$$

در رابطه بالا CI^1 شاخص سازگاری، n تعداد معیارها، CR^2 نرخ سازگاری، λ_{max} حداکثر مقدار ویژه ماتریس که همواره بزرگتر یا مساوی n است و RI شاخص سازگاری تصادفی بوده و از جدول (۳) استخراج می‌شود. چنانچه نرخ سازگاری کمتر یا مساوی $0/1$ باشد، سازگاری سیستم مورد قبول است، در غیر اینصورت باید در قضاوت‌ها برای تشکیل ماتریس مقایسه زوجی تجدید نظر شده و ماتریس‌ها مجدداً تشکیل گردند.

جدول (۳): شاخص سازگاری تصادفی

n	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
RI	۰	۰	۰/۵۸	۰/۹	۱/۱۲	۱/۲۴	۱/۳۲	۱/۴۱	۱/۴۵	۱/۴۹

برای ارزش‌گذاری مقایسه‌ها از طیف فازی معادل مقیاس ساعتی در روش AHP استفاده می‌شود



شکل (۴): اعداد فازی مثلثی M_2 و M_1

ترجیحات بکار رفته برای وزن دهی نسبی به معیارها در روش FAHP در جدول (۴) نشان داده شده است. پس از تشکیل ماتریس مقایسه زوجی، محاسبه ماتریس S برای هر یک از سطرهای ماتریس مقایسه زوجی از رابطه (۱۶) انجام می‌شود:

فرایند تحلیل سلسله مراتبی فازی FAHP

روش فرایند تحلیل سلسله مراتبی فازی اولین بار توسط چانگ در سال ۱۹۹۲ ارائه شد و سپس در سال ۱۹۹۶ توسط وی بهبود داده شد (چانگ^۳، ۱۹۹۶). تئوری فازی در مقابل تئوری قطعی قرار گرفته و برای اولین بار در سال ۱۹۶۵ ارائه شد. در تئوری فازی هدف حذف و بی اثر کردن ابهامات کلامی است چرا که ابهامات و عدم قطعیت همیشه در تصمیم‌گیری‌ها وجود دارد. اعداد فازی به صورت مثلثی و دوزنقه‌ای هستند. اعداد مورد استفاده در روش FAHP اعداد فازی مثلثی هستند. دو عدد فازی M_1 و M_2 در شکل ۴ نشان داده شده‌اند. چانگ جهت تعمیم تکنیک AHP به فضای فازی از مفهوم درجه امکان‌پذیری استفاده کرد. منظور از درجه امکان‌پذیری احتمال بزرگتر بودن یک عدد فازی از یک عدد فازی دیگر است. در روش FAHP ماتریس مقایسه زوجی به صورت فازی بوده و

¹ Chang

⁶ Consistency Index Random

⁷ Consistency Rate

جدول (۴): ترجیحات به کار رفته برای وزن دهی نسبی به معیارها در

روش FAHP

عبارت کلامی مقایسه	معادل فازی	معادل فازی معکوس
ترجیح یکسان	(۱،۱،۱)	(۱،۱،۱)
بینابین	(۱،۲،۳)	(۰/۳۳۳، ۰/۵، ۱)
کمی مرجح	(۲،۳،۴)	(۰/۲۵، ۰/۳۳۳، ۰/۵)
بینابین	(۳،۴،۵)	(۰/۲، ۰/۲۵، ۰/۳۳۳)
خیلی مرجح	(۴،۵،۶)	(۰/۱۶۷، ۰/۲، ۰/۳۳۳)
بینابین	(۵،۶،۷)	(۰/۱۴۲، ۰/۱۶۷، ۰/۲)
خیلی زیاد مرجح	(۶،۷،۸)	(۰/۱۲۵، ۰/۱۴۲، ۰/۱۶۷)
بینابین	(۷،۸،۹)	(۰/۱۱۱، ۰/۱۲۵، ۰/۱۴۲)
کاملاً مرجح	(۸،۹،۱۰)	(۰/۱، ۰/۱۱۱، ۰/۱۲۵)

(۱۷)

$$V(M_2 \geq M_1) = \text{hgt}(M_1 \cap M_2)$$

$$= \mu_{M_2}(d) = \begin{cases} 1 & \text{if } m_2 \geq m_1 \\ 0 & \text{if } l_1 \geq u_2 \\ \frac{l_1 - u_2}{(m_2 - u_2) - (m_1 - l_1)} & \text{otherwise} \end{cases}$$

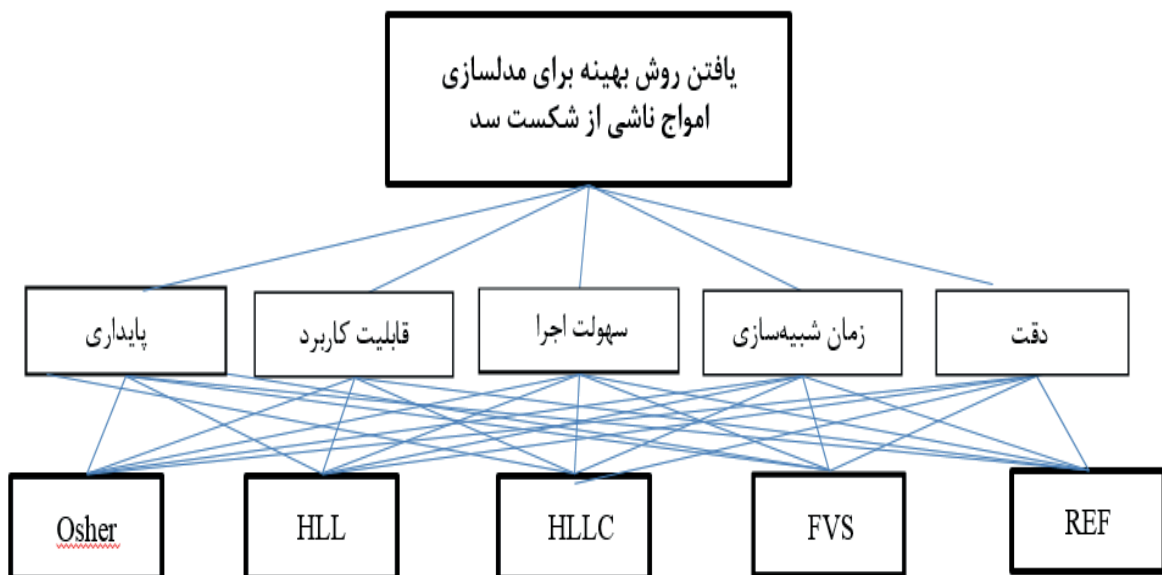
در رابطه فوق $M_1 = (l_1, m_1, u_1)$ و $M_2 = (l_2, m_2, u_2)$ دو عدد فازی مثلثی هستند (شکل (۴)). برای مقایسه M_2 و M_1 به هر دو مقدار $V(M_2 \leq M_1)$ و $V(M_2 \geq M_1)$ نیاز است و امتیاز قطعی غیر فازی برابر حداقل این دو مقدار است.

مدل‌سازی و نتایج

گام اول در روش فرایند سلسله مراتبی، ایجاد ساختار سلسله مراتبی می‌باشد که در راس این ساختار هدف مسئله، در سطح بعدی معیارها و در سطح آخر گزینه‌های موجود قرار دارند. ساختار سلسله مراتبی برای مسئله حاضر مطابق شکل (۵) می‌باشد.

$$S_i = \sum_{j=1}^m M_{gi}^j \otimes \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j \right]^{-1} \quad (۱۶)$$

که در رابطه فوق، M اعداد فازی مثلثی داخل ماتریس مقایسه زوجی هستند. در حقیقت هنگام محاسبه ماتریس S ، هر یک از اجزاء اعداد فازی نظیر به نظیر جمع شده و در معکوس فازی مجموع کل ضرب می‌شود. این مرحله شبیه محاسبه وزن‌های نرمال شده در روش AHP است اما با اعداد



شکل (۵): ساختار سلسله مراتبی برای حل مسئله

فرایند سلسله مراتبی معمولی (AHP)

ابتدا ماتریس مقایسه زوجی معیارها نسبت به یکدیگر و

همچنین ماتریس مقایسه زوجی گزینه‌ها نسبت به معیارها سازگاری و وزن نهایی محاسبه می‌شوند که به ترتیب در تشکیل می‌گردد (جدول (۵) تا جدول (۱۰)). پس از تشکیل

ماتریس مقایسه زوجی، وزن هر گزینه نسبت به معیارها، نرخ

جدول (۵): ماتریس مقایسه زوجی معیارها

	دقت	زمان	سهولت اجرا	قابلیت کاربرد	پایداری
دقت	۱	۳	۴	۶	۷
زمان	۰/۳۳۳	۱	۳	۴	۶
سهولت اجرا	۰/۲۵	۰/۳۳۳	۱	۴	۵
قابلیت کاربرد	۰/۱۶۷	۰/۲۵	۰/۲۵	۱	۴
پایداری	۰/۱۴۳	۰/۱۶۷	۰/۲	۰/۲۵	۱

قابلیت کاربرد	Osher	HLL	HLLC	FVS	REF
Osher	۱	۱	۱	۱	۱
HLL	۱	۱	۱	۱	۱
HLLC	۱	۱	۱	۱	۱
FVS	۱	۱	۱	۱	۱
REF	۱	۱	۱	۱	۱

جدول (۶): ماتریس مقایسه زوجی گزینه‌ها برای دقت

دقت	Osher	HLL	HLLC	FVS	REF
Osher	۱	۶	۴	۵	۳
HLL	۰/۱۶۷	۱	۰/۲۵	۰/۳۳۳	۰/۲۵
HLLC	۰/۲۵	۴	۱	۳	۰/۵
FVS	۰/۲	۳	۰/۳۳۳	۱	۰/۳۳۳
REF	۰/۳۳۳	۴	۲	۳	۱

جدول (۱۰): ماتریس مقایسه زوجی گزینه‌ها برای پایداری

پایداری	Osher	HLL	HLLC	FVS	REF
Osher	۱	۱	۱	۱	۱
HLL	۱	۱	۱	۱	۱
HLLC	۱	۱	۱	۱	۱
FVS	۱	۱	۱	۱	۱
REF	۱	۱	۱	۱	۱

جدول (۷): ماتریس مقایسه زوجی گزینه‌ها برای زمان شبیه‌سازی

زمان	Osher	HLL	HLLC	FVS	REF
Osher	۱	۰/۳۳۳	۰/۳۳۳	۰/۲۵	۳
HLL	۳	۱	۱	۰/۳۳۳	۴
HLLC	۳	۱	۱	۰/۳۳۳	۴
FVS	۴	۳	۳	۱	۵
REF	۰/۳۳۳	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲	۱

جدول (۱۱): نرخ سازگاری برای جداول ۴ تا ۹

شماره جدول	نرخ سازگاری
۴	۰/۰۹۲
۵	۰/۰۵۳
۶	۰/۰۴۵
۷	۰/۰۲۲
۸	۰
۹	۰

جدول (۸): ماتریس مقایسه زوجی گزینه‌ها برای سهولت اجرا

سهولت اجرا	Osher	HLL	HLLC	FVS	REF
Osher	۱	۰/۱۶۷	۰/۲	۰/۳۳۳	۰/۵
HLL	۶	۱	۲	۳	۴
HLLC	۵	۰/۵	۱	۳	۴
FVS	۳	۰/۳۳۳	۰/۳۳۳	۱	۲
REF	۲	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۵	۱

جدول (۹): ماتریس مقایسه زوجی گزینه‌ها برای قابلیت کاربرد

جدول (۱۲): وزن هر گزینه نسبت به معیارها

	دقت	زمان	سهولت اجرا	قابلیت کاربرد	پایداری	وزن نهایی
Osher	۰/۴۶۴	۰/۰۹۲	۰/۰۵۳	۰/۲	۰/۲	۰/۲۸۵
HLL	۰/۰۴۶	۰/۱۹۹	۰/۴۰۶	۰/۲	۰/۲	۰/۱۶۱
HLLC	۰/۱۵۵	۰/۱۹۹	۰/۲۹۷	۰/۲	۰/۲	۰/۱۹۸
FVS	۰/۰۸۳	۰/۴۲۷	۰/۱۳۹	۰/۲	۰/۲	۰/۱۹۹
REF	۰/۲۱۷	۰/۰۵	۰/۰۸۶	۰/۲	۰/۲	۰/۱۵۶

فرایند سلسله مراتبی فازی (FAHP)

در این روش نیز همانند روش AHP، ماتریس مقایسه زوجی معیارها نسبت به یکدیگر و همچنین ماتریس مقایسه زوجی گزینه‌ها نسبت به معیارها تشکیل می‌گردد (جدول (۱۳) تا جدول (۱۸)). پس از تشکیل ماتریس مقایسه زوجی، وزن هر گزینه نسبت به معیارها و وزن نهایی محاسبه می‌شوند که در جدول (۱۹) نشان داده شده‌اند.

همانطور که در جدول (۱۱) مشاهده می‌شود، نرخ سازگاری برای کلیه ماتریس‌ها کمتر از ۰/۱ بوده و بنابراین سازگاری سیستم مورد قبول است. بر اساس وزن نهایی ارائه شده در جدول ۱۲، روش Osher با بیشترین وزن (۰/۲۸۵) در الویت انتخاب قرار گرفته و روش‌های FVS و HLLC با وزن بسیار نزدیک به یکدیگر (۰/۱۹۹ و ۰/۱۹۸) در الویت بعدی قرار دارند و روش‌های HLL و REF به ترتیب در الویت چهارم و پنجم قرار می‌گیرند.

جدول (۱۳): ماتریس مقایسه زوجی فازی معیارها

	دقت	زمان	سهولت اجرا	قابلیت کاربرد	پایداری
دقت	(۱،۱،۱)	(۲،۳،۴)	(۳،۴،۵)	(۵،۶،۷)	(۶،۷،۸)
زمان	(۰/۲۵، ۰/۳۳۳، ۰/۵)	(۱،۱،۱)	(۲،۳،۴)	(۳،۴،۵)	(۵،۶،۷)
سهولت اجرا	(۰/۲، ۰/۲۵، ۰/۳۳۳)	(۰/۲۵، ۰/۳۳۳، ۰/۵)	(۱،۱،۱)	(۳،۴،۵)	(۴،۵،۶)
قابلیت کاربرد	(۰/۱۴۲، ۰/۱۶۷، ۰/۲)	(۰/۲، ۰/۲۵، ۰/۳۳۳)	(۰/۲، ۰/۲۵، ۰/۳۳۳)	(۱،۱،۱)	(۳،۴،۵)
پایداری	(۰/۱۲۵، ۰/۱۴۲، ۰/۱۶۷)	(۰/۱۴۲، ۰/۱۶۷، ۰/۲)	(۰/۱۶۷، ۰/۲، ۰/۲۵)	(۰/۲، ۰/۲۵، ۰/۳۳۳)	(۱،۱،۱)

جدول (۱۴): ماتریس مقایسه زوجی فازی گزینه‌ها نسبت به دقت

دقت	Osher	HLL	HLLC	FVS	REF
Osher	(۱،۱،۱)	(۵،۶،۷)	(۳،۴،۵)	(۴،۵،۶)	(۲،۳،۴)
HLL	(۰/۱۴۲، ۰/۱۶۷، ۰/۲)	(۱،۱،۱)	(۰/۲، ۰/۲۵، ۰/۳۳۳)	(۰/۲۵، ۰/۳۳۳، ۰/۵)	(۰/۲، ۰/۲۵، ۰/۳۳۳)
HLLC	(۰/۲، ۰/۲۵، ۰/۳۳۳)	(۳،۴،۵)	(۱،۱،۱)	(۲،۳،۴)	(۰/۳۳۳، ۰/۵، ۱)
FVS	(۰/۱۶۷، ۰/۲، ۰/۲۵)	(۲،۳،۴)	(۰/۲۵، ۰/۳۳۳، ۰/۵)	(۱،۱،۱)	(۰/۲۵، ۰/۳۳۳، ۰/۵)
REF	(۰/۲۵، ۰/۳۳۳، ۰/۵)	(۳،۴،۵)	(۱،۲،۳)	(۲،۳،۴)	(۱،۱،۱)

جدول (۱۵): ماتریس مقایسه زوجی فازی گزینه‌ها نسبت به زمان شبیه‌سازی

زمان	Osher	HLL	HLLC	FVS	REF
Osher	(۱،۱،۱)	(۰/۲۵، ۰/۳۳۳، ۰/۵)	(۰/۲۵، ۰/۳۳۳، ۰/۵)	(۰/۲، ۰/۲۵، ۰/۳۳۳)	(۲،۳،۴)
HLL	(۲،۳،۴)	(۱،۱،۱)	(۱،۱،۱)	(۰/۲۵، ۰/۳۳۳، ۰/۵)	(۳،۴،۵)
HLLC	(۲،۳،۴)	(۱،۱،۱)	(۱،۱،۱)	(۰/۲۵، ۰/۳۳۳، ۰/۵)	(۳،۴،۵)
FVS	(۳،۴،۵)	(۲،۳،۴)	(۲،۳،۴)	(۱،۱،۱)	(۴،۵،۶)
REF	(۰/۲۵، ۰/۳۳۳، ۰/۵)	(۰/۲، ۰/۲۵، ۰/۳۳۳)	(۰/۲، ۰/۲۵، ۰/۳۳۳)	(۰/۱۶۷، ۰/۲، ۰/۲۵)	(۱،۱،۱)

جدول (۱۶): ماتریس مقایسه زوجی فازی گزینه‌ها نسبت به سهولت اجرا

سهولت اجرا	Osher	HLL	HLLC	FVS	REF
Osher	(۱،۱،۱)	(۰/۱۴۲، ۰/۱۶۷، ۰/۲)	(۰/۱۶۷، ۰/۲، ۰/۲۵)	(۰/۲۵، ۰/۳۳۳، ۰/۵)	(۰/۵، ۱) (۰/۳۳۳)
HLL	(۵،۶،۷)	(۱،۱،۱)	(۱،۲،۳)	(۲،۳،۴)	(۳،۴،۵)
HLLC	(۴،۵،۶)	(۰/۳۳۳، ۰/۵، ۱)	(۱،۱،۱)	(۲،۳،۴)	(۳،۴،۵)
FVS	(۲،۳،۴)	(۰/۲۵، ۰/۳۳۳، ۰/۵)	(۰/۲۵، ۰/۳۳۳، ۰/۵)	(۱،۱،۱)	(۱،۲،۳)
REF	(۱،۲،۳)	(۰/۲، ۰/۲۵، ۰/۳۳۳)	(۰/۲، ۰/۲۵، ۰/۳۳۳)	(۰/۳۳۳، ۰/۵، ۱)	(۱،۱،۱)

جدول (۱۷): ماتریس مقایسه زوجی فازی گزینه‌ها نسبت به قابلیت کاربرد

قابلیت کاربرد	Osher	HLL	HLLC	FVS	REF
Osher	(۱،۱،۱)	(۱،۱،۱)	(۱،۱،۱)	(۱،۱،۱)	(۱،۱،۱)
HLL	(۱،۱،۱)	(۱،۱،۱)	(۱،۱،۱)	(۱،۱،۱)	(۱،۱،۱)
HLLC	(۱،۱،۱)	(۱،۱،۱)	(۱،۱،۱)	(۱،۱،۱)	(۱،۱،۱)
FVS	(۱،۱،۱)	(۱،۱،۱)	(۱،۱،۱)	(۱،۱،۱)	(۱،۱،۱)
REF	(۱،۱،۱)	(۱،۱،۱)	(۱،۱،۱)	(۱،۱،۱)	(۱،۱،۱)

جدول (۱۸): ماتریس مقایسه زوجی فازی گزینه‌ها نسبت به پایداری

پایداری	Osher	HLL	HLLC	FVS	REF
Osher	(۱،۱،۱)	(۱،۱،۱)	(۱،۱،۱)	(۱،۱،۱)	(۱،۱،۱)
HLL	(۱،۱،۱)	(۱،۱،۱)	(۱،۱،۱)	(۱،۱،۱)	(۱،۱،۱)
HLLC	(۱،۱،۱)	(۱،۱،۱)	(۱،۱،۱)	(۱،۱،۱)	(۱،۱،۱)
FVS	(۱،۱،۱)	(۱،۱،۱)	(۱،۱،۱)	(۱،۱،۱)	(۱،۱،۱)
REF	(۱،۱،۱)	(۱،۱،۱)	(۱،۱،۱)	(۱،۱،۱)	(۱،۱،۱)

جدول (۱۹): وزن هر گزینه نسبت به معیارها و وزن نهایی در روش FAHP

	دقت	زمان	سهولت اجرا	قابلیت کاربرد	پایداری	وزن نهایی
Osher	(۰/۴۸۱، ۰/۴۹۵) (۰/۴۶)	(۰/۰۹۴، ۰/۰۹۵، ۰/۱۰۲)	(۰/۰۵۴، ۰/۰۵۶، ۰/۰۵۹)	(۰/۲، ۰/۲، ۰/۲)	(۰/۲، ۰/۲، ۰/۲)	(۰/۲۶۶، ۰/۲۸۳، ۰/۲۹۵)
HLL	(۰/۰۵، ۰/۰۵۳) (۰/۰۵)	(۰/۲۰۲، ۰/۲۰۶، ۰/۲۱۳)	(۰/۳۹۳، ۰/۴۰۶، ۰/۴۱۴)	(۰/۲، ۰/۲، ۰/۲)	(۰/۲، ۰/۲، ۰/۲)	(۰/۱۵۷، ۰/۱۶۳، ۰/۱۷۲)
HLLC	(۰/۱۶، ۰/۱۷۳) (۰/۱۵۸)	(۰/۲۰۲، ۰/۲۰۶، ۰/۲۱۳)	(۰/۳۰۳، ۰/۳۰۶، ۰/۳۱۲)	(۰/۲، ۰/۲، ۰/۲)	(۰/۲، ۰/۲، ۰/۲)	(۰/۱۹۲، ۰/۱۹۷، ۰/۲۱۲)
FVS	(۰/۰۸۷، ۰/۰۹) (۰/۰۸۶)	(۰/۴۲۶، ۰/۴۳۹، ۰/۴۴۱)	(۰/۱۳۶، ۰/۱۴۱، ۰/۱۴۶)	(۰/۲، ۰/۲، ۰/۲)	(۰/۲، ۰/۲، ۰/۲)	(۰/۱۸۹، ۰/۱۹۸، ۰/۲۰۷)
REF	(۰/۲۲۵، ۰/۲۳۴) (۰/۲۰۶)	(۰/۰۵۲، ۰/۰۵۴، ۰/۰۵۵)	(۰/۰۸۶، ۰/۰۸۸، ۰/۰۹۴)	(۰/۲، ۰/۲، ۰/۲)	(۰/۲، ۰/۲، ۰/۲)	(۰/۱۴۲، ۰/۱۵۷، ۰/۱۶۴)

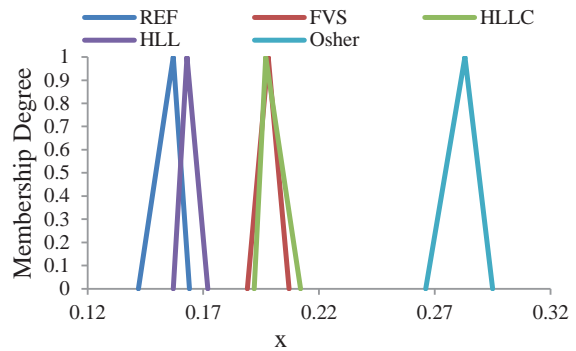
میله‌ای در شکل (۵) نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود در هر دو روش رتبه همه گزینه‌ها یکسان بدست آمده است، فقط روش‌های HLLC و FVS یکسان نیستند که به علت اختلاف بسیار کم آن‌ها می‌باشد و می‌توان هر دو را در الویت دوم پس از روش Osher قرار داد.

نتیجه گیری

تحقیق حاضر با هدف ارزیابی روش‌های شبیه‌سازی عددی امواج شوک ناشی از شکست سد با استفاده از فرایند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و فرایند تحلیل سلسله مراتبی فازی (FAHP) انجام شده است. با در نظر گرفتن پنج معیار مهم در ارزیابی روش‌های عددی یعنی دقت، زمان شبیه‌سازی، سهولت اجرا، قابلیت کاربرد و پایداری تحلیل سلسله مراتبی معمولی و فازی انجام شد. نتایج هر دو روش AHP و FAHP نشان دهنده برتری روش Osher نسبت به سایر روش‌هاست و روش‌های HLLC و FVS با اختلاف کمی در رتبه بعد قرار می‌گیرند. در نهایت روش‌های HLL و REF در الویت‌های بعدی قرار می‌گیرند. همانطور که مشاهده می‌شود روش FVS علی‌رغم اینکه سریع‌ترین روش برای مدل‌سازی بود، با توجه به سایر معیارها و وزن هر کدام اولین رتبه را کسب نکرد که این به دلیل قابلیت روش تحلیل سلسله مراتبی است که با در نظر گرفتن معیارهای مختلف و وزن هر کدام روش بهینه را پیشنهاد می‌کند.

مراجع

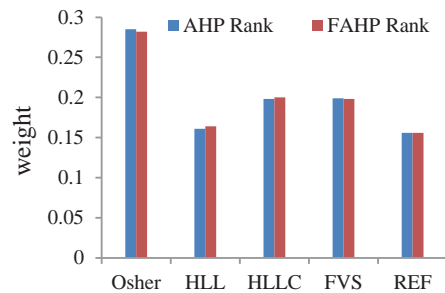
- ۱- طیبی آ. شهبازی ع.ن. بردبار ا. ۱۳۹۵. شناسایی و رتبه‌بندی دلایل تخریب سدهای خاکی با استفاده از تحلیل سلسله مراتبی فازی. نشریه پژوهش‌های کاربردی علوم آب. ۲(۳): ۶۱-۷۰.
- ۲- مومزایی ا. طالبی ع. امامی ن. ۱۳۹۷. مکان یابی سد زیر زمینی با استفاده از فرایند تحلیل سلسله مراتبی و سامانه اطلاعات جغرافیایی (مطالعه موردی: حوزه‌های آبخیز شهرکرد و مرغلک). مجله محیط زیست و مهندسی آب. ۴(۲): ۱۳۷-۱۴۷.



شکل (۶): مقایسه وزن‌های فازی محاسبه شده

جدول (۲۰): وزن‌های نهایی در روش FAHP

وزن نهایی	
Osher	۰/۲۸۲
HLL	۰/۱۶۴
HLLC	۰/۲۰۰
FVS	۰/۱۹۸
REF	۰/۱۵۶



شکل (۷): مقایسه وزن‌های نهایی محاسبه شده در روش‌های AHP و FAHP

وزن‌های نهایی محاسبه شده در روش FAHP که در ستون آخر جدول (۱۹) ارائه شده‌اند در شکل (۶) به صورت شماتیک نمایش داده شده و مقایسه شده‌اند. برای تبدیل اعداد فازی مثلی به عدد قطعی از روش مرکز ثقل استفاده شده است که این مقادیر در جدول (۲۰) ارائه شده‌اند. همانطور که مقایسه وزن‌ها در جدول (۲۰) و در شکل (۶) نشان می‌دهند، روش Osher با وزن ۰/۲۸۲ در رتبه اول قرار می‌گیرد. بعد از آن دو روش HLLC و FVS با اختلاف کمی در رتبه دوم و سوم قرار دارند و روش HLL و REF به ترتیب در رده چهارم و پنجم هستند. مقایسه نتایج بدست آمده از دو روش به صورت نمودار

- finite- difference methods. *Journal of Computational Physics*, 40, 263–293.
- 19- Toro E. F. 1997 Riemann Solvers and Numerical Methods for Fluid Dynamics. *Springer-Verlag, Berlin*.
- Toro E. F. 2001 Shock-capturing methods for free-surface shallow flows. *John Wiley & Sons*.
- 20- Toro E.F., Spruce, M., Speares W. 1994 Restoration of the Constant Surfac in the HLL Riemann Solver. *Shock waves*, 4, 25-34.
- 21- Tseng M-H. 1999 Explicit finite volume non-oscillatory schemes for 2D transient free-surface flows. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 30, 831–843.
- 22- Zhao DH., Shen HW., Tabios III GQ., Lai JS., Tan WY. 1994 Finite-volume two-dimensional unsteady-flow model for river basins. *Journal of Hydraulic Engineering*, 120, 863–882.
- 23- Zhao DH., Shen HW., Lai JS., Tabios III GQ. 1996 Approximate Riemann Solvers in FVM for 2D hydraulic shock wave problems. *Journal of Hydraulic Engineering*, 122, 692–702.
- 24- Zhou Q., Zhan J., Li Y. 2016 High-order finite volume WENO schemes for Boussinesq modeling of nearshore wave processes. *Journal of Hydraulic Engineering*, 54(6), 646-662.
- 25- Zoppou C., Roberts S. 1999 Catastrophic collapse of water supply reservoirs in urban areas. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125, 686–695.
- 26- Zoppou C. and Roberts, S. 2003 Explicit Schemes For Dam-break Simulations. *Journal of Hydraulic Engineering*, 129(1), 11-34.
- 27- Zoppou C. and Robert S. 2004 Explicit Schemes for Dam-Break Simulations. *Journal of Hydraulic Engineering*.
- ۳- نوری ه. شاهدی ک. روشن م.ج. کاویان ع. فرامرزی م. ۱۳۹۸. مطالعه حساسیت به وقوع سیل در حوضه آبخیز رازآور با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP). *مجله مخاطرات محیط طبیعی*. ۸(۱۹): ۳۵-۵۰.
- 4- Alcrudo F., Garcia-Navarro P. 1993 A high-resolution Godunov-type scheme in finite volumes for the 2D shallowwater equations. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 16, 489–505.
- 5- Anastasiou K., Chan CT. 1997 Solution of the 2D shallow water equations using the finite volume method on unstructured triangular meshes. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 24, 1225–1245.
- 6- Cao Z. X., Hu p., Hu k., Pender G., & Liu Q. Q. 2015 Modelling roll waves with shallow water equations and turbulent closure. *Journal of Hydraulic Research*, 53(2), 161-177.
- 7- Chang D.Y. 1996 Application of the extent analysis method on fuzzy AHP. *European Journal of Operational Research*, 95(3), 649-655.
- 8- Chippada S., Dawson CN., Martinez ML., Wheler MF. 1998 A Godunov-type finite volume method for the system of shallow water equations. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 151, 105–129.
- 9- Erduran K.S., Kutija V. and Hewett C.J.M. 2002 Performance of Finite Volume Solutions to the Shallow Water Equations with Shock-Capturing Schemes. *International Journal For Numerical Methods In Fluids*, 40(1), 1237-1273.
- 10- Fennema RJ., Chaudhry MH. 1990 Explicit methods for 2-D transient free-surface flows. *Journal of Hydraulic Engineering*, 116, 1013–1034.
- 11- Garcia R., Kahawita RA. 1986 Numerical solution of the St. Venant equations with the MacCormack finite difference scheme. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 6, 507–527.
- 12- Glaister PA. 1993 Numerical scheme for two-dimensional open channel flows with non-rectangular geometries. *International Journal of Engineering Science*, 31, 1003–1011.
- 13- Harten A, Lax P, van Leer B. 1983 On upstream differencing and Godunov-type schemes for hyperbolic conservation laws. *SIAM Review*, 25, 35–61.
- 14- Hosseinzadeh T.A., Ghaeini-Hessaroeyeh M. 2018 Modeling of dam failure-induced flows over movable beds considering turbulence effects. *Computers & Fluids*, 161, 199-210.
- 15- Mingham CG., Causon DM. 1998 High-resolution finite volume method for shallow water flows. *Journal of Hydraulic Engineering*, 124, 605–614.
- 16- Roe PL. 1981 Approximate Riemann solvers, parameter vectors, and difference schemes. *Journal of Computational Physics*, 43, 357–372.
- 17- Saaty T.L. 1997 A scaling for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology*, 15(3), 234-281.
- 18- Steger JL., Warming RF. 1981 Flux vector splitting of the inviscid gas dynamic equations with application to

Evaluation of Numerical Simulation Methods for Shock Waves Using Analytical Hierarchy Process and Fuzzy Analytical Hierarchy Process

Maryam Ziaadini-Dashtekhaki^۱

Masoud-Reza Hessami Kermani^{۲*}

Mahnaz Ghaeini-Hessaroyeh^۳

Abstract

Dam break in recent decades has caused extensive damage to infrastructure and economic activities in different parts of the world, so the study of this phenomenon is considered as one of the most important issues in hydraulic engineering. Considering the importance of the dam break, various methods have been proposed for numerical modeling of the resulting waves. Recently, the finite volume method based on shallow water equations with the ability to model shock waves has been welcomed by many researchers due to the high resolution of this method in the modeling of various supercritical, subcritical, steady, unsteady, continuous and discontinuous flows. The shallow water equations are nonlinear and their solution is limited to a certain number of states, such as the approximate Riemann solvers. Several types of approximate Riemann solvers have been suggested that are more economical than the exact solution of the Riemann problem. The five widely used methods are HLL (Harten-Lax-van Leer), HLLC (Harten-Lax-van Leer-Contact) designed as an improvement to the classical HLL, Osher, FVS (Flux Vector Splitting) and REF (Roe with Entropy Fixed). Important features of mentioned numerical methods include five factors of accuracy, simulation time, ease of implementation, applicability for different issues and stability. The Analytical Hierarchy Process (AHP) and Fuzzy Analytical Hierarchy Process (FAHP) provide convenient approaches for solving complex Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) problems in engineering. The AHP and the FAHP are the decision support tools which can be used to solve complex decision problems. They use a multi-level hierarchical structure of objectives, criteria, subcriteria, and alternatives. In the present study, the performance of the five widely used methods by researchers, which are the most important approximation solvers of the Riemann problem, are investigated according to the criteria of accuracy, simulation time, ease of implementation, applicability and stability based on AHP and FAHP. Each methods are evaluated in terms of the decision criteria based on the weight of each criterion and pairwise comparisons are used to determine the relative importance of each method in terms of each criterion. Pairwise comparisons are quantified by using a scale. In the AHP and the FAHP the pairwise comparisons in a judgment matrix are considered to be adequately consistent, as the corresponding consistency ratio was less than 10%. The AHP and the FAHP yielded the same ranking for the five methods. The final computed weights based on the AHP for Osher, HLLC, FVS, HLL and REF methods are 0.285, 0.198, 0.199, 0.161 and 0.156 respectively. The FAHP final computed weights for Osher, HLLC, FVS, HLL and REF methods are 0.282, 0.200, 0.198, 0.164 and 0.156 respectively. The results of both the AHP and the FAHP methods show that the Osher method appear to be superior to the other types of approximate Riemann solvers. Then the HLLC and the FVS methods, with slight difference in weight, are ranked next, and finally the HLL and the REF methods are in the fourth and fifth priorities. The FVS method, despite being the fastest method for modeling, did not rank first due to the ability of the AHP and the FAHP methods, which take into account different criteria.

Keywords:

-
1. Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.
 - 2*. Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.
 3. Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.