

کاربرد روش GRA در بهینه‌سازی طول و موقعیت آبشکن تیغه‌ای در قوس 90°

معصومه رستم آبادی^{1*}، ماندانا ناجی ابهری²

1- استادیار مهندسی آب، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بوئین زهرا، بوئین زهرا

2- دانش آموخته دکتری مهندسی آب، دانشگاه تربیت مدرس

* بوئین زهرا، صندوق پستی: 34519-1157

rostamimass@yahoo.com

چکیده - آبشکن‌ها سازه‌هایی هستند که به منظور حفاظت و احیای ساحل در ساماندهی رودخانه‌ها بکار برده می‌شوند. در قوس رودخانه‌ها که جریان ثانویه منجر به فرسایش بیشتر ساحل خارجی می‌شود، آبشکن‌ها می‌توانند در تثبیت و احیای ساحل به‌کار روند. در صورتی که آبشکن در قوس مورد استفاده قرار گیرد، اندرکنش آبشکن و قوس، منجر به ایجاد الگوی جریان پیچیده‌ای در قوس و خصوصاً در محدوده اطراف آبشکن می‌شود. پارامترهای هندسی آبشکن و قوس و پارامترهای هیدرولیکی جریان، بر الگوی جریان ناشی از اندرکنش آبشکن و قوس تأثیرگذارند. شناخت اثر هریک از این پارامترها بر الگوی جریان و عملکرد آبشکن، به کاربرد بهتر این سازه در قوس منجر می‌شود. در تحقیق حاضر، الگوی جریان حول آبشکن واقع در مسیر قوسی شکل با تغییر موقعیت قرارگیری و طول آبشکن در شرایط هیدرولیکی مختلف با استفاده از مدل‌سازی عددی بررسی شد و با در نظر گرفتن عملکرد هیدرولیکی آبشکن و پایداری سازه‌ای آن، ترکیب بهینه پارامترهای طول و موقعیت آبشکن در قوس در اعداد فرود مختلف با استفاده از روش GRA بررسی شد. نتایج نشان داد، در محدوده تحت بررسی پارامترهای تحقیق حاضر، طول آبشکن تأثیر بیشتری نسبت به موقعیت آن در قوس بر عملکرد آبشکن دارد و در صورتی که پایداری سازه‌ای آبشکن مدنظر قرار گیرد آبشکن با طول 25 درصد عرض آبراهه اصلی برای کلیه اعداد فرود و در هر موقعیتی از قوس دارای عملکرد بهتری است.

کلیدواژگان: آبشکن، قوس 90° درجه، شبیه‌سازی عددی، SSIIM، بهینه‌سازی، GRA.

1- مقدمه

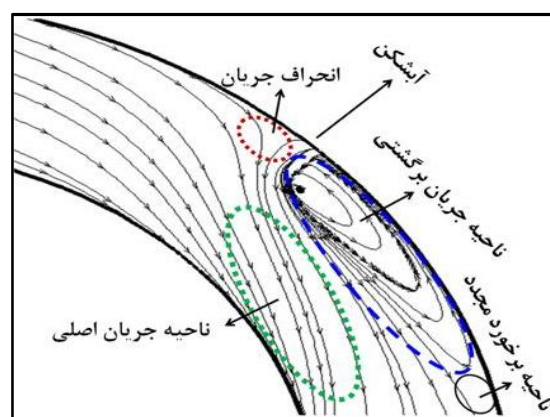
میان روش‌های مختلف حفاظت دیواره‌های خارجی مسیرهای قوسی، ساخت آبشکن‌ها کاربرد بسیار زیادی در مهندسی رودخانه دارد. آبشکن‌ها سازه‌هایی هستند که به شکل‌های تیغه‌ای عمود بر ساحل یا تیغه‌ای مایل، L و T ساخته می‌شوند. هدف از کاربرد آبشکن‌ها، جلوگیری از حمله جریان به دیواره ساحلی قوس خارجی، ایجاد

انجام اقدامات اصولی برای مهار رودخانه‌ها و استفاده بهینه از آنها از اهمیت خاصی برخوردار است. رودخانه‌های دارای مسیرهای قوسی شکل، با مسأله آبشستگی و فرسایش ساحل در دیواره خارجی قوس و رسوبگذاری در دیواره داخلی قوس مواجه هستند. در

ناحیه جریان برگشتی نشان داده شده در شکل 1 مستعد رسوبگذاری و احیای ساحل و ناحیه جریان اصلی مستعد آبشستگی و عمیق شدن آبراهه است. پارامترهای هندسی آبشکن مانند طول و موقعیت آبشکن در قوس و نیز پارامترهای هیدرولیکی مانند عدد فرود جریان، بر ابعاد نواحی جریان نشان داده شده در شکل 1 و عملکرد هیدرولیکی آبشکن تأثیرگذارند. شناخت اثر هر یک از این پارامترها بر الگوی جریان و عملکرد آبشکن و تعیین ترکیب بهینه‌ای از آن‌ها به کاربرد بهتر این سازه در قوس منجر می‌شود.

Uijtewaal (2001) با تحقیق بر روی میدان جریان حول یک آبشکن نتیجه گرفت که نسبت طول به عرض میدان آبشکن می‌تواند بیانگر تعداد و شکل گردابه‌های نمایان شده در ناحیه جریان ایستا باشد و هنگامی که این نسبت نزدیک به یک باشد، یک گردابه ایجاد می‌شود. McCoy و همکاران (2005) میدان جریان اطراف آبشکن‌های عمودی را با استفاده از روش LES شبیه‌سازی کردند. نتایج بررسی‌های آنها نشان داد که جدایی جریان، گردایان فشار منفی و گردابه‌های غیردایمی از مشخصات اصلی میدان جریان اطراف آبشکن می‌باشد. نتایج مطالعات Fazli و همکاران (2008) نشان داد که چاله آبشستگی اطراف آبشکن در قوس 90 درجه تحت تأثیر موقعیت قرارگیری آبشکن در قوس، عدد فرود جریان و طول آبشکن می‌باشد. با افزایش موقعیت قرارگیری آبشکن از ابتدای قوس، طول ناحیه جریان چرخشی در بالادست آبشکن افزایش و طول ناحیه جریان چرخشی در پایین‌دست آن کاهش می‌یابد. مطالعات آزمایشگاهی Vaghefi و Ghodsian (2009) نشان دادند که با افزایش عدد فرود جریان و طول آبشکن، حداکثر عمق آبشستگی اطراف آبشکن T شکل مستقر در قوس 90 درجه و ابعاد چاله آبشستگی افزایش می‌یابد. ناجی ابهری (1386) تأثیر تغییرات طول آبشکن بر الگوی جریان را در یک قوس

ساحل جدید پس از پرشدن محدوده بین آبشکن‌ها با رسوب و هدایت خط‌القعر جریان در جهت مناسب است. الگوی جریان حول آبشکن، متأثر از پارامترهای هندسی آبشکن مانند طول و موقعیت آن در قوس است. الگوی جریان در قوس نیز تحت تأثیر پارامترهای هیدرولیکی مانند عدد فرود جریان و هندسه قوس است. اندرکنش آبشکن و قوس، منجر به ایجاد الگوی جریان پیچیده‌ای در قوس، خصوصاً در محدوده اطراف آبشکن می‌شود. مطابق شکل 1 میدان جریان در اطراف آبشکن تیغه‌ای عمود بر ساحل قوس 90 درجه به چهار ناحیه اصلی تقسیم می‌شود (Chen and Ikeda, 1997): (1) ناحیه جریان اصلی: این ناحیه فضای بین آبشکن و دیواره داخلی قوس است که جریان اصلی پس از برخورد به آبشکن به سمت این ناحیه منحرف می‌شود. (2) ناحیه جریان برگشتی: فضایی در پشت آبشکن است که در اثر وجود آبشکن و انسداد مسیر جریان اصلی و ایجاد ناحیه کم فشار در پشت آبشکن بوجود می‌آید. (3) لایه برشی: مرز بین ناحیه جریان اصلی و جریان برگشتی است. (4) ناحیه برخورد مجدد: جریان اصلی پس از گذر از ناحیه اصلی و محدوده جریان برگشتی مجدداً به سمت دیواره خارجی منحرف می‌شود. محل برخورد مجدد جریان اصلی با دیواره خارجی قوس، ناحیه برخورد مجدد نامیده می‌شود.

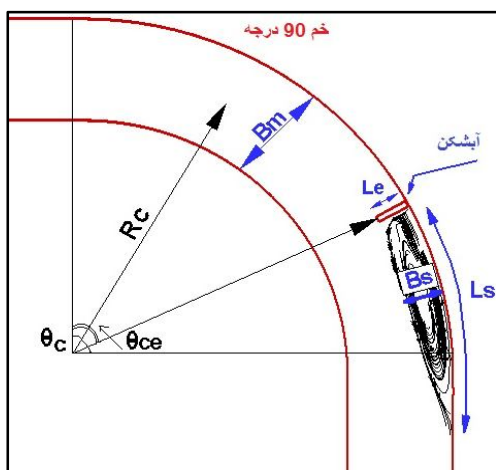


شکل 1 قسمت‌های مختلف میدان جریان حول آبشکن (بر گرفته از (Chen and Ikeda, 1997)

2- روش حل

2-1- طراحی مطالعات و روش بهینه‌سازی

عملکرد آبشکن با ابعاد ناحیه جدایی جریان در پایین دست آن و تغییرات ایجاد شده در توپوگرافی بستر در محدوده تحت تأثیر آبشکن سنجیده می‌شود. پارامترهای مؤثر بر عملکرد آبشکن عبارتند از: ρ جرم حجمی سیال (در این مطالعه سیال آب است)، μ لزجت دینامیکی سیال؛ d_{50} قطر متوسط مصالح بستر، ρ_s چگالی مصالح، B_m عرض کانال، h_m عمق جریان، R_c شعاع مرکزی قوس، θ_c زاویه مرکزی قوس، L_e طول آبشکن، θ_{ce} موقعیت آبشکن، Q_w دبی، L_s طول ناحیه جدا شده در پایین دست آبشکن، B_s عرض ناحیه جدا شده در پایین دست آبشکن، τ_s تنش برشی در آبراهه اصلی و τ_e تنش برشی حول آبشکن. پارامترهای هندسی فوق در شکل 2 نشان داده شده است. در تحقیق حاضر عملکرد آبشکن در بستر صلب مورد ارزیابی قرار گرفت. لذا پارامترهای رسوب بدون تأثیر هستند، اما تنش برشی به عنوان معیاری برای بررسی نواحی محتمل تغییر توپوگرافی بستر مدنظر قرار گرفت.



شکل 2 طرح شماتیک طول و عرض ناحیه جدا شده در پایین دست آبشکن

بر اساس تحلیل ابعادی، تنش برشی در محدوده آبشکن و

90 درجه مطالعه نمود و نشان داد افزایش طول آبشکن منجر به افزایش مقدار تنش برشی اطراف آبشکن می‌شود. نتایج تحقیقات آزمایشگاهی مهرنهاد و قدسیان (1391) در بررسی تأثیر پارامترهایی چون طول آبشکن و قطر مصالح بر میزان آشفستگی ایجاد شده پیرامون آبشکن T شکل مستقر در قوس 90 درجه نشان داد ابعاد چاله آشفستگی با طول آبشکن نسبت مستقیم و با قطر مصالح نسبت معکوس دارد. مطالعات آزمایشگاهی Masjedi و همکاران (2010) نشان داد با افزایش عدد فرود جریان و افزایش طول جان و بال آبشکن T شکل، مقدار آشفستگی در قوس 180 درجه افزایش می‌یابد. Masjedi و همکاران (2011) نشان دادند کمترین و بیشترین مقدار آشفستگی اطراف آبشکن L شکل مستقر در قوس 180 درجه زمانی اتفاق می‌افتد که آبشکن به ترتیب در موقعیت‌های 30 درجه و 75 درجه نصب شده باشد. همچنین با افزایش طول آبشکن و افزایش عدد فرود جریان ماکزیمم عمق آشفستگی افزایش می‌یابد. Rashedipour و همکاران (2012) تغییرات زمانی چاله آشفستگی اطراف آبشکن در موقعیت‌های 30، 45، 60 و 75 درجه مستقر در قوس 180 درجه را بصورت آزمایشگاهی بررسی کردند. نتایج بدست آمده نشان داد با گذشت زمان بیشترین مقدار آشفستگی اطراف آبشکن نصب شده در موقعیت 75 درجه اتفاق می‌افتد. بررسی تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد که مطالعه الگوی جریان اطراف آبشکن‌ها بطور گسترده صورت گرفته است، اما بهینه‌سازی پارامترهای هندسی سازه آبشکن با در نظر گرفتن عملکرد هیدرولیکی آن کمتر مورد توجه محققان بوده است. لذا در تحقیق حاضر الگوی جریان حول آبشکن با تغییر طول و موقعیت آبشکن در قوس و عدد فرود جریان با استفاده از مدل شبیه‌سازی شده و با در نظر گرفتن عملکرد هیدرولیکی آبشکن، بهینه‌سازی پارامترهای هندسی و هیدرولیکی آن صورت گرفت.

صورت گرفت، لذا از تغییرات B_m/h_m نیز صرف نظر شد. از طرفی جریان کاملاً آشفته و عدد رینولدز نیز قابل صرف نظر بود. لذا پارامترهای بی‌بعد مؤثر بر عملکرد هیدرولیکی آبشکن سه پارامتر سمت راست رابطه (2) خواهند بود:

$$\frac{\tau_s}{\rho v^2}, \frac{\tau_e}{\rho v^2}, \frac{L_s}{B_m}, \frac{B_s}{B_m} = f\left(\frac{L_e}{B_m}, \frac{\theta_{ce}}{\theta_c}, Fr\right) \quad (2)$$

برای بررسی تأثیر پارامترهای هندسی و هیدرولیکی بر عملکرد آبشکن، مطابق جدول 2 هریک از این پارامترها در سه سطح تغییر در نظر گرفته شده‌اند. بنابراین 27 حالت مختلف از ترکیب پارامترهای Fr ، θ_{ce}/θ_c و L_e/B_m بررسی خواهد شد. در جدول 3 سطح تغییر هریک از پارامترهای بی‌بعد در 27 گزینه مذکور نشان داده شده است.

2-2- مدل عددی

در شبیه‌سازی از مدل عددی SSIIM¹ (Olsen, 2011) استفاده شد. این مدل با حل معادلات رینولدز (ناویر استوکس متوسط‌گیری شده در زمان) با روش حجم محدود و الگوی انفصال Power low یا SOU با کوپل سرعت و فشار با روش SIMPLE و به صورت ضمنی به حل میدان جریان می‌پردازد. از مدل آشفتگی دو معادله‌ای k-ε در مدل‌سازی تنش‌های رینولدز استفاده شد.

در کانال اصلی و نیز ابعاد ناحیه جدایی جریان، برحسب سایر پارامترهای بی‌بعد از رابطه 1 تعیین می‌شود:

$$\frac{\tau_s}{\rho v^2}, \frac{\tau_e}{\rho v^2}, \frac{L_s}{B_m}, \frac{B_s}{B_m} = f\left(\frac{L_e}{B_m}, \frac{\theta_{ce}}{\theta_c}, Fr, \frac{B_m}{h_m}, \frac{R_c}{B_m}, Re, \theta_c\right) \quad (1)$$

در رابطه (1)، v سرعت جریان، Re عدد رینولدز و Fr عدد فرود است. شرایط هندسی تحقیق حاضر، با توجه به کانال آزمایشگاهی پناه‌پور (1384) در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تربیت مدرس (شکل 3) در نظر گرفته شد. در جدول 1 ویژگی‌های هندسی و هیدرولیکی این کانال نشان داده شده است.



شکل 3 کانال آزمایشگاهی پناه‌پور (1384)

با توجه به ثابت بودن ابعاد کانال آزمایشگاهی، از تغییرات پارامترهای θ_c ، B_m و R_c صرف نظر شد. همچنین تغییرات عدد فرود در کانال اصلی با عمق جریان ثابت و دبی متغیر

جدول 1 پارامترهای هندسی و هیدرولیکی کانال (پناه‌پور، 1384)

ویژگی‌های هیدرولیکی آبشکن		ویژگی‌های هندسی کانال							ویژگی‌های هیدرولیکی	
L_e (cm)	θ_{ce} (درجه)	θ_c (درجه)	L_d (m)	L_u (m)	B_m (m)	R_{in} (m)	R_{out} (m)	Q_w (lit/s)	h_m (m)	
15, 10, 5	60, 45, 30	90°	5/5	5/5	0/6	1/5	2/1	45, 30, 15	0/2	

جدول 2 پارامترهای قابل تغییر و محدوده تغییر آنها

پارامتر	سطوح تغییر	محدوده تغییر
Le (cm)	3 سطح	5، 10 و 15
θ_{ce} (درجه)	3 سطح	30، 45 و 60
Fr	3 سطح	0/09، 0/18، 0/27

جدول 3 ترکیب متغیرها در مطالعات فاکتوریل کامل

$\frac{\theta_{ce}}{\theta_c}$	$\frac{L_e}{B_m}$	Fr	$\frac{v_{ce}}{v_c}$	$\frac{\theta_{ce}}{\theta_c}$	$\frac{L_e}{B_m}$	Fr	$\frac{v_{ce}}{v_c}$
0/67	0/17	0/18	15	0/34	0/08	0/09	1
0/34	0/17	0/27	16	0/5	0/08	0/09	2
0/5	0/17	0/27	17	0/67	0/08	0/09	3
0/67	0/17	0/27	18	0/34	0/08	0/18	4
0/34	0/25	0/09	19	0/5	0/08	0/18	5
0/5	0/25	0/09	20	0/67	0/08	0/18	6
0/67	0/25	0/09	21	0/34	0/08	0/27	7
0/34	0/25	0/18	22	0/5	0/08	0/27	8
0/5	0/25	0/18	23	0/67	0/08	0/27	9
0/67	0/25	0/18	24	0/34	0/17	0/09	10
0/34	0/25	0/27	25	0/5	0/17	0/09	11
0/5	0/25	0/27	26	0/67	0/17	0/09	12
0/67	0/25	0/27	27	0/34	0/17	0/18	13
				0/5	0/17	0/18	14

منظور با سعی و خطا، عمق جریان در پایین دست به گونه‌ای تنظیم شد که عمق جریان در بالادست به مقدار آزمایشگاهی برسد. زبری کف در کلیه مطالعات سه برابر قطر متوسط مصالح در نظر گرفته شد. برای مرزهای صلب از قانون استاندارد دیواره استفاده شد. در نتیجه تنظیم فاصله گره‌ها در جهت عمود بر جداره از اهمیت خاصی برخوردار است. Schlichting (1995) پیشنهاد داد مقدار y به گونه‌ای انتخاب شود که پارامتر y^+ بین 30 تا 3000 باشد تا قانون نیمرخ سرعت بین جداره و مرکز نزدیکترین سلول مجاور جداره از رابطه (3) تبعیت کند.

$$y^+ = \frac{U^* y}{\nu} \quad (3)$$

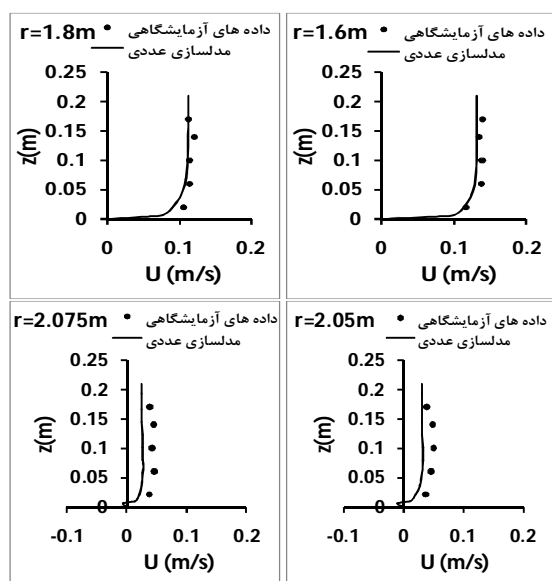
در این رابطه y فاصله مرکز سلول واقع در ناحیه کاملاً آشفته تا جداره کانال، U^* سرعت برشی و ν لزجت سینماتیکی سیال است. لذا در انتخاب شبکه بندی میدان در جهت عرضی و ارتفاعی این نکته باید کنترل شود. در جهت طول کانال نیز شبکه بندی میدان باید طوری باشد که در نواحی ای که تغییرات پارامترهای جریان شدیدتر است (مانند نواحی داخل قوس و اطراف آبشکن) از شبکه ریزتری استفاده شود. (Olsen 2000) برای جلوگیری از واگرایی معادلات پیشنهاد نمود شبکه مورد نظر در دو جهت طول و عرض به گونه‌ای انتخاب شود که نسبت Δx به Δy هر سلول بین 2 تا 3 باشد. در تحقیق حاضر، هندسه و شبکه محاسباتی کلیه مطالعات با استفاده از برنامه نویسی به زبان فرترن تولید شده است. در شکل 4 شبکه محاسباتی تولید شده در قوس که در نزدیکی دیواره خارجی قوس و محل آبشکن از سلولهای ریزتری تشکیل شده، نشان داده شده است.

3- صحت سنجی مدل عددی

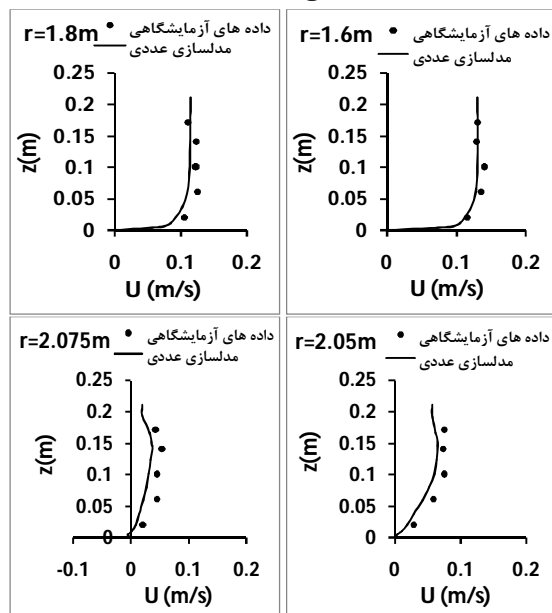
برای بررسی صحت محاسبات مدل‌های عددی لازم است نتایج حاصل از مدل سازی عددی با مقادیر اندازه گیری شده آزمایشگاهی مقایسه شود.

2-3- مدل سازی گزینه های طراحی شده

پس از ساخت هندسه مدل، شرایط مرزی باید تعریف شود. در مدل عددی در ورودی میدان جریان از شرط مرزی دبی معلوم و در خروجی میدان جریان از شرط مرزی گرادیان صفر استفاده شد. برای محاسبه سطح آزاد، عمق جریان در یکی از سلول‌های مقطع خروجی به عنوان شرط اولیه به مدل داده شد و در سایر سلول‌های سطحی، با توجه به میدان سرعت و فشار بدست آمده از حل عددی، عمق جریان محاسبه شد. از آنجا که در جریان های زیربحرانی مقطع کنترل در پایین دست است، لازم است عمق جریان در پایین دست مشخص باشد. بدین



الف- مقاطع بالادست آبشکن

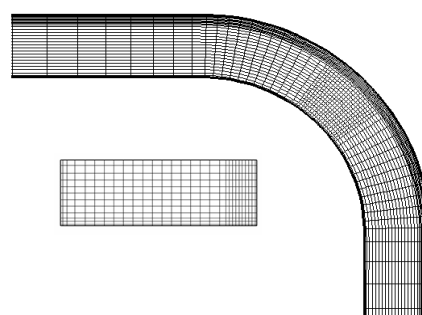


ب- مقاطع پایین‌دست آبشکن

شکل 5 مقایسه نتایج مدل عددی با داده‌های آزمایشگاهی در

شرایط $Q=15 \text{ Lit/s}$, $L_e=5 \text{ cm}$ و $\theta_{ce}=30^\circ$

شکل 5- ب نیمرخ‌های سرعت را در مقطع پایین‌دست آبشکن نشان می‌دهد. در این شکل روند تغییرات نیمرخ‌های سرعت در $r=1/8 \text{ m}$ و $r=1/6 \text{ m}$ مشابه مقاطع بالادست آبشکن است. در $r=2/075 \text{ m}$ نیمرخ‌های سرعت طولی در ناحیه نزدیک بستر منفی است و در ترازهای



شکل 4 شبکه محاسباتی تولید شده در قوس

در این تحقیق نتایج مدل‌سازی نیمرخ‌های سرعت طولی (U) در شرایط $Q=15 \text{ Lit/s}$ ، $L_e=5 \text{ cm}$ و $\theta_{ce}=30^\circ$ با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد و به عنوان نمونه در مقاطع بالادست آبشکن (27/5درجه) و پایین‌دست آن (32/5 درجه) با مقادیر اندازه‌گیری شده آزمایشگاهی در شکل 5 ارائه شده است.

در شکل 5- الف نیمرخ‌های سرعت طولی در بالادست آبشکن ارائه شده است. در این شکل r نشان دهنده شعاع قوس در مقاطع مختلف اندازه‌گیری می‌باشد. چنانچه $r=1/8 \text{ m}$ یا $r=1/6 \text{ m}$ باشد نیمرخ‌های سرعت به شکل لگاریتمی می‌باشد، به گونه‌ای که در ناحیه نزدیک بستر ($z < 2 \text{ cm}$) مقادیر با نرخ فزاینده‌ای افزایش می‌یابد و پس از رسیدن به مقادیر بیشینه خود، مقادیر سرعت در ترازهای بالاتر ($z > 5 \text{ cm}$) تقریباً ثابت می‌باشد و این روند تا تراز سطح آب ادامه می‌یابد. چنانچه $r=2/05 \text{ m}$ یا $r=2/075 \text{ m}$ باشد مقادیر سرعت نزدیک بستر منفی بوده و با افزایش تراز، مقادیر سرعت تغییر علامت داده و مثبت می‌شوند. مقادیر ناچیز منفی در نزدیک بستر در مجاورت قوس خارجی نشان دهنده تاثیرات آبشکن بر میدان جریان می‌باشد. در واقع جریان پس از برخورد به آبشکن در خلاف جهت جریان اصلی به سمت بالادست منحرف می‌شود. با توجه به اینکه طول آبشکن در این حالت تنها 8 درصد عرض کانال می‌باشد، بنابراین مقادیر منفی سرعت طولی نزدیک بستر ناچیز می‌باشد.

از نرم‌افزار Tecplot در دماغه آبشکن و در ناحیه جریان اصلی (مشخص شده در شکل 1) استخراج شده است.

جدول 4 مقادیر توابع هدف در 27 مدل

شماره گزینه	$\frac{B_s}{B_m}$	$\frac{L_s}{B_m}$	$\frac{\tau_s}{\rho v^2}$	$\frac{\tau_e}{\rho v^2}$
1	0/207	1/245	0/0019	0/00166
2	0/228	1/24	0/00198	0/00179
3	0/237	1/275	0/00203	0/00179
4	0/204	1/282	0/00176	0/0016
5	0/225	1/273	0/00192	0/00176
6	0/235	1/300	0/00192	0/00192
7	0/203	1/345	0/00185	0/00171
8	0/223	1/333	0/00199	0/00185
9	0/234	1/336	0/00199	0/00199
10	0/314	2/389	0/00288	0/0032
11	0/340	2/233	0/00288	0/0032
12	0/353	1/938	0/00288	0/00352
13	0/315	2/386	0/00288	0/0032
14	0/340	2/255	0/00288	0/00352
15	0/335	2/003	0/00288	0/00352
16	0/300	2/277	0/00287	0/00391
17	0/325	2/193	0/00284	0/00402
18	0/388	1/918	0/00304	0/0042
19	0/408	3/29	0/00429	0/00499
20	0/423	2/900	0/0045	0/0051
21	0/442	2/888	0/00449	0/00524
22	0/427	3/226	0/00438	0/00533
23	0/442	2/876	0/00458	0/00546
24	0/452	2/843	0/00458	0/0056
25	0/417	3/238	0/00458	0/00604
26	0/435	2/9	0/00469	0/00613
27	0/450	3/887	0/00474	0/00627

بالاتر مقادیر سرعت تغییر علامت داده و مثبت می‌شوند. مقادیر منفی در نزدیک بستر در پایین دست آبشکن به علت وجود جریان‌های برگشتی می‌باشد. مقایسه نتایج مدل‌سازی عددی و داده‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد که مدل عددی SSIIM توانسته است الگوی جریان اطراف آبشکن مستقر در قوس 90 درجه را با همان روند نتایج آزمایشگاهی و با دقت قابل قبولی شبیه‌سازی کند.

4- استخراج نتایج مدل‌سازی

پس از اجرای مدل‌ها، نتایج هر مدل استخراج و تحلیل شد. به منظور استخراج نتایجی که در تعیین شرایط بهینه طول و موقعیت آبشکن در قوس بتواند مورد استفاده قرار گیرد، چهار تابع هدف مختلف در نظر گرفته شد:

- 1- بیشینه طول ناحیه جداشدگی در ناحیه جریان برگشتی (L_s) به منظور محقق شدن احیای ساحل؛
- 2- بیشینه عرض ناحیه جداشدگی در ناحیه جریان برگشتی (B_s) به منظور محقق شدن احیای ساحل؛
- 3- بیشینه تنش برشی در ناحیه جریان اصلی (τ_s) به منظور عمیق نمودن کانال؛
- 4- کمینه تنش برشی در لبه آبشکن (τ_e) به منظور حفظ پایداری سازه آبشکن.

در جدول 4 مقادیر توابع هدف مذکور بی بعد شده در 27 گزینه مختلف نشان داده شده است. لازم بذکر است تنش برش در مدل عددی SSIIM بر اساس رابطه (4) محاسبه می‌شود (Olsen, 2000).

$$\tau = \rho U_*^2 = \rho \frac{\kappa U}{\ln\left(\frac{30y}{k_s}\right)} \left(c_\mu^{\frac{1}{4}} \sqrt{k}\right) \quad (4)$$

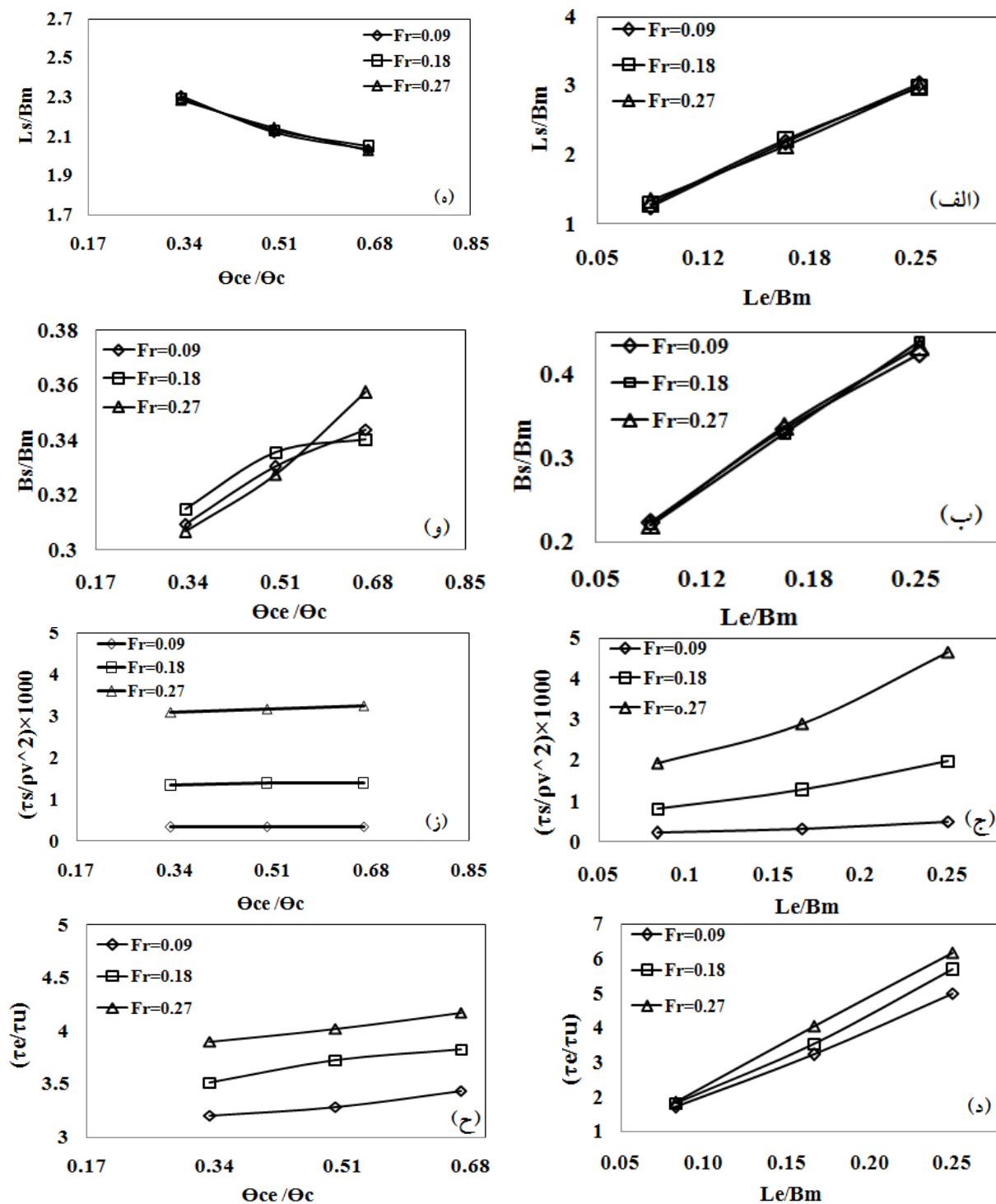
در این رابطه U_* سرعت برشی، U سرعت، κ ثابت فن کارمن، k_s زبری بستر، y فاصله تا بستر، k انرژی جنبشی آشفتگی و c_μ ضریب ثابت است. با توجه به صلب بودن بستر، از ضریب مانینگ جنس کف کانال برای محاسبه زبری استفاده شده است. مقادیر تنش‌های جدول 4 با استفاده

5- بحث و نتیجه‌گیری

به منظور بررسی نتایج، تأثیر تغییر هر یک از پارامترهای

Fr ، θ_{ce}/θ_c و L_e/B_m بر $\frac{L_s}{B_m}$ ، $\frac{B_s}{B_m}$ ، $\frac{\tau_s}{\rho v^2}$ ، $\frac{\tau_e}{\rho v^2}$ مورد

بررسی قرار گرفته و در شکل 6 نشان داده شده است. در شکل‌های 6- د و ح، تنش برشی در بالادست است و تنش در محدوده آبشکن نسبت به آن بی‌بعد شده است.



شکل 6 تأثیر تغییر طول و موقعیت آبشکن بر توابع هدف

مطابق شکل 6:

- افزایش طول آبشکن با افزایش طول و عرض ناحیه جدایی جریان در پایین دست آبشکن همراه است.
 - با تغییر عدد فرود، تغییر بسیار ناچیزی در ابعاد ناحیه جدایی جریان در پایین دست آبشکن رخ داده است.
 - در یک عدد فرود ثابت، با افزایش طول آبشکن، تنش برشی در ناحیه جریان اصلی و حول آبشکن افزایش یافته است. تحقیقات آزمایشگاهی مهرنهاد و قدسیان (1391) پیرامون آبشکن T شکل مستقر در قوس 90 درجه نشان داد ابعاد چاله آبستگی با طول آبشکن نسبت مستقیم دارد. از آنجائیکه در این تحقیق تنش برشی به عنوان معیاری برای بررسی آبستگی اطراف آبشکن مورد توجه قرار گرفته است، لذا نتیجه بدست آمده در تحقیق حاضر با نتیجه آزمایشگاهی مذکور هماهنگی دارد.

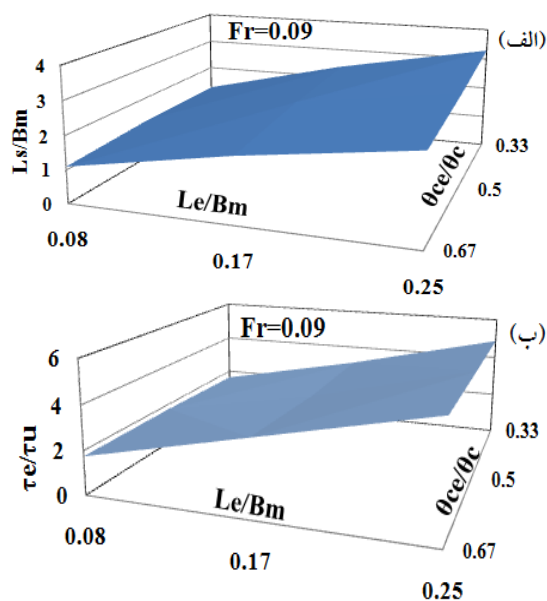
- در آبشکن با طول و موقعیت ثابت، با افزایش عدد فرود، تنش برشی در ناحیه جریان اصلی و تنش برشی حول آبشکن افزایش می‌یابد. مطالعات آزمایشگاهی Vaghefi و Ghodsian (2009) نشان داد که با افزایش عدد فرود جریان و طول آبشکن، بیشینه عمق آبستگی اطراف آبشکن T شکل مستقر در قوس 90 درجه و ابعاد چاله آبستگی افزایش می‌یابد. مطالعات آزمایشگاهی Masjedi و همکاران (2010) نیز نشان داد با افزایش عدد فرود جریان و افزایش طول جان و بال آبشکن T شکل در قوس 180°، مقدار آبستگی افزایش می‌یابد. این نتیجه نیز با نتایج آزمایشگاهی ارائه شده مطابقت دارد.

- افزایش طول آبشکن و افزایش عدد فرود، هردو منجر به افزایش تنش برشی می‌شود. البته با افزایش عدد فرود، تنش برشی با شیب تندتری زیاد شده است.
 - با افزایش فاصله آبشکن از ورودی قوس، طول ناحیه جدایی جریان کاهش و عرض ناحیه جدایی جریان

افزایش یافته است. Fazli و همکاران (2008) نشان دادند با افزایش موقعیت قرارگیری آبشکن از ابتدای قوس، طول ناحیه جریان چرخشی در پایین دست آن کاهش می‌یابد.

- در یک عدد فرود ثابت، تغییرات موقعیت آبشکن در قوس بر مقدار تنش برشی در ناحیه جریان اصلی و تنش برشی حول آبشکن تأثیر ناچیزی دارد.

در شکل‌های 7- الف و ب به عنوان نمونه تغییرات L_s/B_m و τ_c/τ_u با تغییر همزمان پارامترهای θ_{ce}/θ_c و L_e/B_m در یک عدد فرود ثابت نشان داده شده است. مطابق این شکل‌ها با افزایش طول آبشکن تنش برشی حول آبشکن زیاد شده، در حالی که کاهش تنش برشی حول آبشکن تابع هدف مطلوب است. همچنین با افزایش θ_{ce}/θ_c تابع هدف L_s/B_m کاهش یافته که باید در شرایط مطلوب افزایش یابد.



شکل 7 نمایش سه بعدی تغییر پارامترهای L_s/B_m و τ_c/τ_u با تغییر همزمان پارامترهای θ_{ce}/θ_c و L_e/B_m در یک عدد فرود ثابت

در جدول 5 به طور خلاصه تأثیر تغییر طول و موقعیت

الف. GRG

ابتدا باید مقادیر توابع پاسخ اندازه‌گیری شده بصورت بی بعد و بین صفر و یک مرتب شوند. هدف از این کار دادن وزن یکسان و بعد یکسان به توابع پاسخ مختلف است. بدین منظور، با توجه به معیار بهینه نمودن هر تابع پاسخ، از یکی از روابط 5 تا 7 برای بی بعد نمودن استفاده می‌شود:

اگر قرار است تابع پاسخ کمینه شود:

$$x_i(k) = \frac{\max x_i^o(k) - x_i^o(k)}{\max x_i^o(k) - \min x_i^o(k)} \quad (5)$$

اگر قرار است تابع پاسخ بیشینه شود:

$$x_i(k) = \frac{x_i^o(k) - \min x_i^o(k)}{\max x_i^o(k) - \min x_i^o(k)} \quad (6)$$

اگر قرار است تابع پاسخ به یک مقدار خاص x^o برسد:

$$x_i(k) = 1 - \frac{x_i^o(k) - x^o}{\max x_i^o(k) - x^o} \quad (7)$$

در روابط فوق $x_i^o(k)$ مقدار اندازه‌گیری شده برای تابع پاسخ k ام و $x_i(k)$ مقدار بی بعد شده $x_i^o(k)$ است.

$\max x_i^o(k)$ و $\min x_i^o(k)$ به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار $x_i^o(k)$ در کل مطالعات صورت گرفته هستند. در مطالعات این تحقیق $k=4$ (تعداد تابع هدف) و $i=1-9$ در سه دسته می‌باشد. در محاسبه GRG برای توابع پاسخ (1)، (2) و (3) یعنی طول ناحیه جداشدگی در ناحیه جریان برگشتی، عرض ناحیه جداشدگی در ناحیه جریان برگشتی و تنش برشی در ناحیه جریان اصلی از رابطه 6 (چون قرار است بیشینه شود) و برای محاسبه GRG تابع پاسخ (4) (که قرار است کمینه گردند) از رابطه 5 استفاده شده است.

ب. GRC

GRC برای نشان دادن ارتباط بین مقادیر بی بعد شده تابع پاسخ و مقدار ایده‌آل تابع پاسخ بی بعد شده (یعنی مقدار 1) محاسبه می‌شود و به صورت رابطه (8) تعریف می‌شود:

آبشکن بر هریک از توابع هدف نشان داده شده است. با توجه به اینکه با افزایش طول و موقعیت آبشکن در قوس، روند ثابتی برای افزایش یا کاهش توابع هدف مشاهده نمی‌شود، لذا با قضاوت مهندسی نمی‌توان ترکیب بهینه پارامترهای طول و موقعیت آبشکن را برای نیل به توابع هدف موردنظر تعیین نمود و لازم است با روش مناسبی ترکیب بهینه مشخص شود.

جدول 5 اثر تغییر طول و موقعیت آبشکن بر توابع هدف

تغییر پارامتر آبشکن	تغییر تابع هدف	بهینه تابع هدف
+ Le	+ Bs	+ Bs
+ Le	+ Ls	+ Ls
+ Le	+ ts	+ ts
+ Le	+ te	- te
+ θce	+ Bs	+ Bs
+ θce	- Ls	+ Ls
+ θce	ثابت ts	+ ts
+ θce	ثابت te	- te

روش‌های مختلفی برای بهینه‌سازی مسائل با چندین تابع پاسخ وجود دارد؛ مانند قضاوت مهندسی، وزن دهی به توابع مختلف، رگرسیون چند متغیره و روش GRA^2 (Jeyapaul et al, 2005). روش GRA یکی از روش‌هایی است که می‌تواند بهینه‌سازی چندین تابع پاسخ را به بهینه‌سازی یک تابع پاسخ تبدیل نماید (Caydas and Deng, 2008). این روش را اولین بار (Deng, 1989) مطرح نمود و در بسیاری از شاخه‌های علوم مورد استفاده قرار گرفته است. GRA یک فرایند شامل چند تابع پاسخ را در گام‌های 1-GRG، 2-GRC، 3-GRG و 4-GRD به یک تابع پاسخ تبدیل می‌نماید (Aydin et al, 2010):

2. Grey Relational Analysis
3. Grey Relational Generation
4. Grey Relational Coefficient
5. Grey Relational grade

(1) تا (4) در دسته‌های 9 تایی ازگزینه‌هایی که دارای عدد فرود ثابت هستند، نشان داده شده است. در ستون رتبه، مقادیر GRD از بزرگ به کوچک مرتب شده‌اند. مطابق این جداول گزینه‌های شماره 9، 16 و 18 و گزینه 27 دارای بیشترین مقدار GRD هستند.

در این گزینه‌ها سطوح سوم پارامترهای طول و موقعیت آبشکن وجود دارد، لذا می‌توان گفت سطح سوم پارامترها دارای بهترین عملکرد است.

به منظور تعیین تأثیر تغییر سطوح هریک از پارامترها بر تابع هدف نهایی، باید از GRD یک دسته سه تایی از گزینه‌هایی که سطح مورد نظر پارامتر مفروض در آنها ظاهر شده است، طبق رابطه (10) میانگین‌گیری کرد.

$$GRD(F)_j = \frac{1}{nj} \sum GRD_{ij} \quad (10)$$

در این رابطه nj تعداد مطالعاتی است که سطح j فاکتور F در آن ظاهر شده است و GRD_{ij} مربوط به گزینه شماره i است که سطح j فاکتور F در آن ظاهر شده است. برای مثال سطح "1" پارامتر L_e/B_m در گزینه‌های 1، 2، 3 در جدول 4 ظاهر شده است، لذا تأثیر (L_e/B_m) بر GRD بر اساس داده‌های جدول 6 عبارتست از:

$$GRD(L_e/B_m)_1 = \frac{(0/5001+0/4903+0/4951)}{3} = 0/495$$

$$GRC_i(k) = \frac{\Delta_{\min} + \zeta \cdot \Delta_{\max}}{\Delta_{oi}(k) + \zeta \cdot \Delta_{\max}}$$

$$\Delta_{oi}(k) = \|x_o(k) - x_i(k)\|; \quad x_o(k) = 1 \quad (8)$$

در رابطه (8)، Δ_{\min} و Δ_{\max} به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار $\Delta_{oi}(k)$ هستند. ζ عددی بین صفر تا 1 است که برای ممانعت از نامعینی GRCها به کار می‌رود و تأثیری در نتایج ندارد. در این تحقیق $\zeta=0/5$ به کار رفته است. در محاسبه GRC، ابتدا مقادیر $\Delta_{oi}(k)$ برای توابع پاسخ مختلف ($k=1-4$) در گزینه‌های دارای یک عدد فرود ($i=1-9$) محاسبه شده و سپس از رابطه (8) GRC محاسبه شده است.

ج. GRD

طبق رابطه (9) با متوسط‌گیری از مقادیر GRC، GRD محاسبه می‌شود.

$$GRD_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n GRC_i(k) \quad (9)$$

بدین ترتیب طبق رابطه 9، چند تابع پاسخ تبدیل به یک تابع پاسخ می‌شود که مقدار آن عددی بین صفر و یک است. ترکیبی که دارای بیشترین مقدار GRD باشد، مطلوب‌ترین حالت است. در رابطه 9 برای کلیه توابع پاسخ وزن یکسان در نظر گرفته شده است. در جداول 6 تا 8 مقادیر پارامترهای روش GRA به ازای توابع پاسخ

جدول 6 مقادیر پارامترهای روش GRA به ازای توابع پاسخ (1) تا (4) در $Fr=0/09$

رتبه	G.R.D	G.R.C				G.R.G				شماره گزینه
		(4)	(3)	(2)	(1)	(4)	(3)	(2)	(1)	
5	0/5001	1/0	0/333	0/333	0/334	1/0	0/0	0/0	0/003	1
8	0/4903	0/933	0/34	0/354	0/333	0/964	0/03	0/089	0/0	2
7	0/4951	0/933	0/345	0/365	0/337	0/964	0/05	0/131	0/017	3
6	0/4987	0/538	0/446	0/479	0/532	0/571	0/378	0/456	0/561	4
4	0/5031	0/538	0/446	0/537	0/492	0/571	0/378	0/568	0/484	5
9	0/4842	0/491	0/446	0/569	0/431	0/481	0/378	0/622	0/341	6
2	0/7472	0/35	0/86	0/779	1/0	0/07	0/919	0/858	1/0	7
3	0/7329	0/342	1/0	0/865	0/724	0/039	1/0	0/922	0/809	8
1	0/7616	0/333	0/995	1/0	0/718	0/0	0/997	1/0	0/804	9

جدول 7 مقادیر پارامترهای روش GRA به ازای توابع پاسخ (1) تا (4) در $Fr=0/18$

رتبه	G.R.D	G.R.C				G.R.G				شماره گزینه
		(4)	(3)	(2)	(1)	(4)	(3)	(2)	(1)	
5	0/5002	1/0	0/333	0/333	0/334	1/0	0/0	0/0	0/004	10
7	0/4899	0/926	0/346	0/354	0/333	0/96	0/057	0/087	0/0	11
9	0/4773	0/862	0/346	0/364	0/337	0/92	0/057	0/127	0/014	12
4	0/5055	0/556	0/454	0/475	0/538	0/6	0/398	0/447	0/57	13
6	0/4981	0/51	0/454	0/527	0/501	0/52	0/398	0/552	0/503	14
8	0/4808	0/51	0/454	0/515	0/444	0/52	0/398	0/53	0/374	15
1	0/7653	0/349	0/88	0/832	1/0	0/68	0/932	0/899	1/0	16
3	0/7508	0/342	1/0	0/925	0/736	0/036	1/0	0/96	0/821	17
2	0/7629	0/333	1/0	1/0	0/718	0/0	1/0	1/0	0/804	18

جدول 8 مقادیر پارامترهای روش GRA به ازای توابع پاسخ (1) تا (4) در $Fr=0/27$

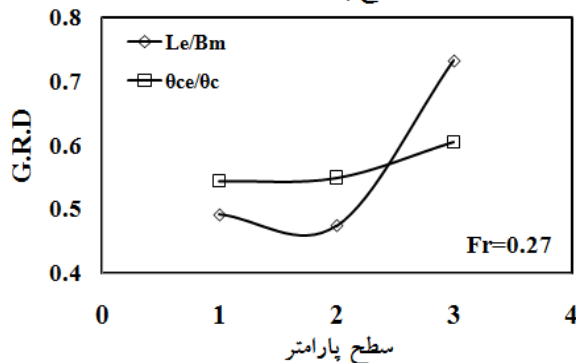
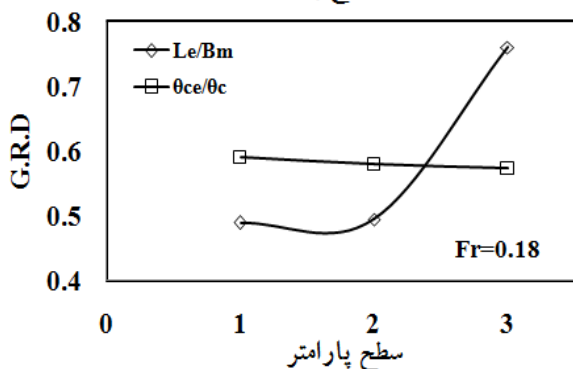
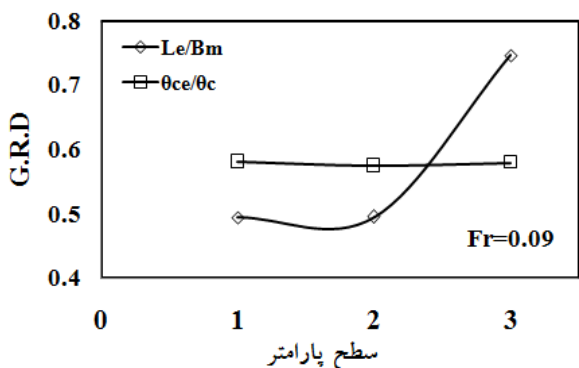
رتبه	G.R.D	G.R.C				G.R.G				شماره گزینه
		(4)	(3)	(2)	(1)	(4)	(3)	(2)	(1)	
4	0/5003	1/0	0/333	0/333	0/334	1/0	0/0	0/0	0/005	19
6	0/4928	0/941	0/345	0/352	0/333	0/969	0/049	0/08	0/0	20
7	0/4827	0/889	0/345	0/363	0/334	0/938	0/049	0/124	0/001	21
9	0/4595	0/509	0/436	0/451	0/442	0/517	0/352	0/392	0/37	22
8	0/4639	0/496	0/433	0/497	0/43	0/492	0/345	0/493	0/337	23
5	0/4995	0/478	0/459	0/667	0/393	0/455	0/411	0/75	0/229	24
3	0/6744	0/345	0/902	0/787	0/663	0/051	0/946	0/865	0/746	25
2	0/6918	0/34	0/971	0/892	0/564	0/031	0/985	0/939	0/613	26
1	0/8333	0/333	1/0	1/0	1/0	0/0	1/0	1/0	1/0	27

در مطالعات پیشین مانند Ghodsian and Vaghefi, (2009), Masjedi و همکاران (2010) و مهرنهاد و قدسیان (1391) طول‌های 0/1، 0/15، 0/2 و 0/25 عرض آبراهه اصلی برای آبشکن T شکل انتخاب شد و نشان دادند افزایش طول آبشکن منجر به افزایش آبشستگی حول آبشکن می‌شود، اما مقدار بهینه‌ای برای طول ارائه نشد. در تحقیق حاضر بیشینه تنش برشی حول آبشکن تابع هدف مطلوب بوده است، لذا طول بیشینه 0/25 عرض آبراهه اصلی که دارای بیشترین مقدار تنش برشی

به همین ترتیب می‌توان برای سایر سطوح پارامترهای مورد مطالعه، GRD را تعیین نمود. نمودارهای شکل 8 تأثیر تغییر سطوح پارامترهای هندسی را بر GRD نشان می‌دهد. مطابق شکل 8:

- تغییر در مقدار طول آبشکن باعث تغییرات بسیار زیاد بر تابع هدف نهایی شده است و برای نیل به کلیه اهدافی که در تحقیق حاضر مدنظر بوده است، آبشکنی با طول معادل 0/25 عرض آبراهه اصلی مناسب خواهد بود.

فرود مختلف در قوس در نظر گرفته شد و پس از تحلیل نتایج الگوی جریان و در نظر گرفتن توابع هدف مختلف، با استفاده از روش *GRA* به یکی نمودن توابع هدف به منظور تعیین شرایط بهینه‌ای که کلیه توابع هدف را پوشش دهد، پرداخته شد.



شکل 8 تأثیر تغییر سطوح پارامترهای هندسی طول و موقعیت آبشکن بر GRD در اعداد فرود مختلف

نتایج نشان داد موقعیت آبشکن در قوس تأثیر بسیار کمی بر تغییرات توابع هدف مورد نظر دارد، در حالی که تغییر در طول آبشکن بر عملکرد آبشکن بسیار مؤثر است و

حول آبشکن است، طول بهینه بدست آمده است. این نتیجه با نتایج مطالعات پیشین هماهنگی دارد.

- تغییر در مقدار θ_{ce}/θ_c تأثیر بسیار ناچیزی بر تغییرات تابع هدف نهایی دارد، بنابراین با توجه به شرایط هندسی محل نصب آبشکن میتوان آبشکن را در هر محلی نصب نمود، بدون آنکه تغییرات زیادی در نتیجه و عملکرد آبشکن بوجود آید. در مطالعه آزمایشگاهی Rashedipour و همکاران (2012) موقعیت‌های 30، 45، 60 و 75 درجه در قوس 180 درجه برای آبشکن بررسی شد. نتایج نشان داد با گذشت زمان بیشترین مقدار آبستنگی اطراف آبشکن نصب شده در موقعیت 75 درجه اتفاق می‌افتد. در تحقیق حاضر تنش برشی به عنوان معیاری برای بررسی آبستنگی مدنظر قرار گرفته است. از آنجائیکه تنش برشی در بستر صلب فقط معیاری برای شروع آبستنگی است و با گذشت زمان، تنش برشی در بستر صلب قادر به توجه مقدار آبستنگی نخواهد بود، اما نتیجه بدست آمده در تحقیق حاضر با نتیجه مطالعه Fazli و همکاران (2008) که به بررسی موقعیت‌های 30، 45، 60 و 75 درجه در قوس 90 درجه برای آبشکن پرداختند و نشان دادند با افزایش موقعیت قرارگیری آبشکن از ابتدای قوس، طول ناحیه جریان چرخشی در پایین‌دست آن کاهش می‌یابد، هماهنگ است.

- روند تقریباً یکسان نمودارهای شکل 8 در اعداد فرود مختلف، نشان می‌دهد در اعداد فرود مختلف، عملکرد آبشکن یکسان است و آبشکن با طول معادل 0/25 عرض آبراهه اصلی در هر موقعیتی از قوس دارای عملکرد بهینه است.

6- نتیجه گیری

در این تحقیق بهینه‌سازی پارامترهای هندسی آبشکن در قوس در شرایط هیدرولیکی مختلف صورت گرفت. سه طول و سه موقعیت مختلف برای آبشکن در سه عدد

τ_e تنش برشی حول آبشکن
 τ_u تنش برشی در بالادست

9- منابع

پناهپور، ن. (1384). بررسی آزمایشگاهی الگوی جریان حول تک آبشکن در قوس 90 درجه. پایان‌نامه کارشناسی ارشد هیدرولیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس.

مهرنهاد، ع و قدسیان، م. (1391)، بررسی آزمایشگاهی تاثیر پارامترهای طول آبشکن و قطر مصالح بر آبستگي پیرامون آبشکن T شکل مستقر در قوس 90 درجه، مجله تحقیقات منابع آب، شماره 2، ص.ص. 71-79.

ناجی ابهری، م. (1386). شبیه‌سازی عددی آبستگي حول آبشکن در قوس 90 درجه. پایان‌نامه کارشناسی ارشد هیدرولیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس.

Aydin, H; Bayram, A, Esme, U, Kazancoglu, Y. and Guven, O; (2010). "Application of grey relational analysis (GRA) and Taguchi method for the parametric optimization of friction stir welding (FSW) process"; Materials and Technology, 44, pp. 205-211.

Caydas, U. and Hascalik, A. (2008). "Use of the grey relational analysis to determine optimum laser cutting parameters with multi-performance characteristics"; Optic and Laser Technology, 40, pp. 987-994.

Chen, Y. and Ikeda, S. (1997). "Horizontal separation flow in shallow open channel with spur dike", Journal of Science and Hydraulic Engineering, 15(2), pp. 15-30.

Deng, J. (1989). "Introduction to grey system"; Journal of Grey Systems, 1, pp. 1-24.

Fazli, M., M. Ghodsian and S.A.A. Salehi, (2008). "Scour and flow field around a spur dike in a 90° bend", International J. Sediment Res., 23(1), pp. 56-68.

Ghodsian, M. and M. Vaghefi, (2009). "Experimental study on scour and flow field in a scour hole around a T-shape spur dike in a 90° bend", International J. Sediment Res., 24(2), pp. 145-158.

Jeyapaul, R.; Shahabudeen, P. and Krishnaiah, K. (2005). "Quality management research by considering multi-response problems in the Taguchi

آبشکنی با طولی معادل 0/25 عرض قوس در اعداد فرود مختلف دارای عملکرد بهتری بر اساس توابع هدف مدنظر در تحقیق حاضر است. لازم بذکر است نتایج حاصل از روش فاکتوریل کامل و به تبع آن بهینه‌سازی GRA محدود به سطوح پارامترهای مورد بررسی است و قابل تعمیم به نقاط حد فاصل سطوح نیست.

7- تقدیر و تشکر

مقاله حاضر بخشی از طرح پژوهشی است که با حمایت مالی دانشگاه آزاد اسلامی واحد بوئین زهرا انجام شده است. بدین وسیله نویسندگان مراتب سپاسگزاری خود را از دانشگاه آزاد اسلامی واحد بوئین زهرا اعلام می‌دارند.

8- فهرست علائم

B_m	عرض کانال
B_s	عرض ناحیه جداشده در پایین دست آبشکن
d_{50}	قطر متوسط مصالح بستر
h_m	عمق جریان
k_s	زبری بستر
L_e	طول آبشکن
L_s	طول ناحیه جداشده در پایین دست آبشکن
Q_w	دبی
R_c	شعاع مرکزی قوس
U^*	سرعت برشی
$x_i^o(k)$	مقدار اندازه گیری شده برای تابع پاسخ k ام
$x_i(k)$	مقدار بی بعد شده $x_i^o(k)$
y	فاصله تا بستر
κ	ثابت فن کارمن
ρ	جرم حجمی سیال
ρ_s	جرم مخصوص مصالح
μ	لزجت دینامیکی سیال
θ_c	زاویه مرکزی قوس
θ_{ce}	موقعیت آبشکن
τ_s	تنش برشی در آبراهه اصلی

Norwegian University of Science and Technology.

Olsen, N. R. (2011). "A three-dimensional numerical model for simulation of sediment movement in water intakes with multi block option", User's Manual.

Rashedipoor, A., Masjedi, A. and Shojaenjad, R., (2012). "Investigation on scour hole around spur dike in a 180 degree flume bend". World Applied Sciences Journal 19 (7), pp. 24-928.

Uijtewaal, W., Lehmann, D. and Mazijk, A. (2001). "Exchange processes between a river and its groyne fields: model experiments", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 127(11), pp. 928-936.

method- a review", Int. J. Adv. Manuf. Technol., 26, pp. 1331-1337.

Masjedi, A., Dehkordi, V., Alinejadi, M. and Taeedi, A., (2010). "Experimental study on scour depth around a T-shape spur dike in a 180 degree bend". World Applied Sciences Journal 10(10), pp. 1146-1152.

Masjedi, A., Akbari, I. and Abyar, H., (2011). "Evaluating scour at L-shape spur dike in a 180 degree bend", World Applied Sciences Journal 15 (12), pp. 1740-1745.

McCoy, A., Constantinescu, G., and Weber, L. (2005). "Coherent structures in a channel with groyne fields: a numerical investigation using LES", World Water and Environmental Resources Congress. Alaska, United States, May 15-19.

Olsen, N. R. B. (2000). "CFD modeling of bed changes during flushing of a reservoir", NTNU,