

بهینه‌سازی پارامترهای هندسی آب‌شکن محافظ با استفاده از روش تاگوچی و GRA

امین عطاردی^۱، حجت کرمی^{۱*}، عبدالله اردشیر^۲ و خسرو حسینی^۱

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۱/۲۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۳/۲۷)

چکیده

به‌طور کلی طراحی‌های مهندسی نیاز به بهینه‌سازی فاکتورهای مؤثر در پدیده مورد مطالعه دارند که اغلب به روندی پرهزینه و طولانی مدت می‌انجامد. در این راستا روش‌های جدیدی به‌وجود آمده‌اند که می‌توانند بهینه‌سازی را با تعداد کمتر آزمایش‌ها انجام دهند از این‌رو مقرون به‌صرفه‌تر هستند. در این مطالعه سعی شده است از روش‌های تاگوچی و تاگوچی-GRA برای طراحی پارامترهای هندسی آب‌شکن محافظ استفاده شود به‌نحوی که بهینه‌ترین عملکرد را در کاهش آبشستگی سری آب‌شکن‌ها داشته باشد. نتایج حاصل از هر دو روش سطح بهینه برای نسبت فاصله آب‌شکن محافظ به طول آب‌شکن اول را برابر با $2/5$ و زاویه آب‌شکن محافظ را 90° درجه نشان می‌دهند. حال آنکه نسبت طول آب‌شکن محافظ به طول آب‌شکن اصلی در روش تاگوچی $0/8$ و در روش تاگوچی-GRA برابر $0/6$ به‌دست آمد. علاوه بر این با استفاده از آنالیز واریانس مشخص شد که فاصله آب‌شکن محافظ از آب‌شکن اول، زاویه آب‌شکن محافظ و طول آب‌شکن محافظ به‌ترتیب بیشترین تأثیر در عملکرد آب‌شکن محافظ را دارا هستند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که هر دو روش توانایی بالایی در بهینه‌سازی دارند و بنابراین می‌توانند در مطالعات مهندسی هیدرولیک مفید واقع شوند.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی، روش تاگوچی، روش GRA، آب‌شکن محافظ

۱. گروه مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده عمران، دانشگاه سمنان، ایران

۲. گروه مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه امیرکبیر، تهران، ایران

*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: hkarami@semnan.ac.ir

مقدمه

طراحی‌های مهندسی اغلب شامل مراحل تصمیم‌گیری برای گرفتن مقادیر مناسب تعداد زیادی متغیر هستند. روش‌های قدیمی روش یک فاکتور در یک زمان (OFAT (One Factor At a Time) و سعی و خطا هستند که معمولاً برای کامل کردن طراحی زمان‌بر و پرهزینه خواهند بود و بنابراین ممکن است طراحی ناقص صورت گیرد و یا روند طراحی ناتمام باقی بماند (۱۳). با ظهور روش‌های طراحی آزمایش‌ها به‌عنوان نقطه عطفی بر انجام آزمایش‌ها با روش‌های قدیمی، فصل جدیدی در مطالعات آزمایشگاهی به وجود آمد. انواع مختلف روش‌های طراحی آزمایش‌ها وجود دارند که از جمله آنها روش‌های فاکتوریل کامل و جزئی هستند. روش تاگوچی یکی از انواع روش‌های طراحی آزمایش فاکتوریل جزئی است که برای بهینه‌سازی پارامترهای طراحی به کار می‌رود. از آنجا که روش تاگوچی با استفاده از آرایه‌های متعامد به‌طور چشمگیری می‌تواند از تعداد آزمایش‌هایی که باید انجام شوند بکاهد، نسبت به روش‌های یک فاکتور در یک زمان و فاکتوریل کامل مقرون به صرفه‌تر است.

روش تاگوچی توسط بسیاری از پژوهشگران و در شاخه‌های مختلف علوم استفاده شده است از جمله می‌توان در مهندسی شیمی و بیوسانایات آلام راجو (۲۲)، در مهندسی برق آی و همکاران (۱)، در مهندسی کشاورزی کاتاتا-سرو و همکاران (۸)، در مهندسی مواد زنگ و همکاران (۲۳)، در مهندسی مدیریت خاک و منابع آب صادقی و همکاران (۱۷) و در مهندسی مکانیک صدر و همکاران (۱۸) را نام برد. در مهندسی هیدرولیک نیز رستم‌آبادی و همکاران از روش تاگوچی روی مدل آزمایشگاهی پاکلیارا و پالرمو (۱۲) که به‌صورت فاکتوریل کامل انجام شده بود، استفاده کردند و نشان دادند که این روش از توانایی بالایی در پیش‌بینی موقعیت بهینه سازه محافظ در برابر آبشستگی جت‌های ریزشی برخوردار است (۱۴). یکی از ضعف‌های روش تاگوچی عدم توانایی آنالیز

پدیده‌هایی است که در آنها چند تابع پاسخ دخیل است (۱۰). برای بهینه‌سازی این پدیده‌ها روش‌های مختلفی به‌وجود آمده است از جمله این روش‌ها قضاوت مهندسی، رگرسیون چندمتغیره، و روش GRA (Grey Relational Analysis) است. بنابراین چنانچه روش‌های تاگوچی و GRA همزمان به کار روند می‌توان از ویژگی‌های هر دو روش بهره برد و یک پدیده با چند تابع پاسخ را با انجام تعداد کمتری از آزمایش‌ها بهینه‌سازی کرد. روش ترکیبی تاگوچی - GRA در بسیاری از مطالعات پژوهشگران به کار رفته است که از آن جمله می‌توان به مطالعات کی‌یو و همکاران (۹) و همچنین لین و لین (۱۱) در مهندسی تکنولوژی، تارنگ و همکاران (۲۰) در مهندسی مکانیک، جفری کیو و همکاران (۵) در مهندسی کنترل چیانگ و سی‌یه (۳) در مهندسی صنایع اشاره کرد. در مهندسی هیدرولیک نیز رستم‌آبادی و همکاران به بررسی عددی شاخص‌های هندسی صفحات مستغرق به‌کمک روش ترکیبی تاگوچی - GRA پرداختند. ایشان در مطالعه خود چهار تابع پاسخ را به‌صورت همزمان مدنظر قرار دادند و نتایج آنالیز داده‌ها و بهینه‌سازی فاکتورها را گزارش کردند (۱۵).

یکی از سازه‌های مهندسی پرکاربرد که به‌منظور حفاظت دیواره‌های رودخانه‌ها، هدایت خط القعر و بهبود شرایط زیست‌آبی ساخته می‌شوند، آب‌شکن‌ها هستند (۴). این سازه‌ها معمولاً به‌صورت سری ساخته می‌شوند و از آنجا که آب‌شکن اول در معرض شدیدترین آبشستگی قرار می‌گیرد اتخاذ تمهیداتی برای محافظت از آن ضروری به‌نظر می‌رسد (۴). یکی از روش‌های مقابله با آبشستگی موضعی سازه‌های قرار گرفته درون آب استفاده از سازه‌های محافظ مانند آب‌شکن محافظ است. آب‌شکن محافظ به‌دلیل انحراف جریان در حال عبور باعث کاهش چشمگیر آبشستگی در اطراف سازه اصلی می‌شود (۷). اندرواژ در سال ۱۹۹۷ به‌بررسی آزمایشگاهی محافظت از یک آب‌شکن منفرد با تعبیه آب‌شکن محافظ با طولی کوتاه‌تر در بالادست آن انجام داد و درنهایت چنین گزارش کرد که طول آب‌شکن محافظ باید بین ۰/۱۲۵ و

مواد و روش‌ها

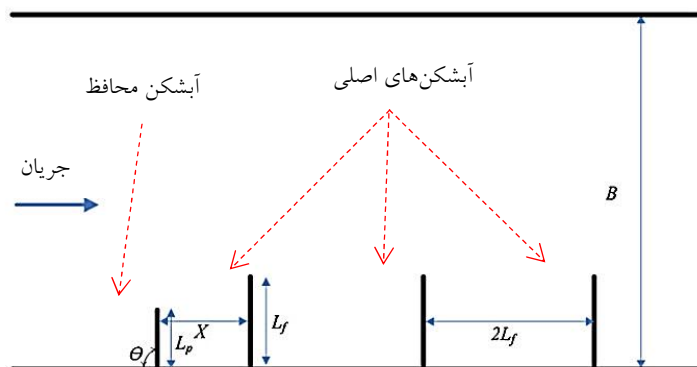
مشخصات مدل آزمایشگاهی کرمی (۲۰۱۱) و روش طراحی آزمایش‌ها

در مطالعات آزمایشگاهی کرمی (۶) تغییرات بیشینه عمق آبشستگی در اطراف آب‌شکن‌های اصلی در حضور آب‌شکن محافظ با طول، زاویه و فاصله‌های مختلف از آب‌شکن‌های اصلی مورد بررسی قرار گرفته است. این مطالعه در کانالی به طول ۱۴ متر و عرض ۱ متر واقع در آزمایشگاه محیط متخلخل دانشگاه امیرکبیر صورت گرفته است. طول آب‌شکن‌های اصلی ۲۵ سانتی‌متر و فاصله آنها از یکدیگر ۵۰ سانتی‌متر بوده است. همچنین از ذرات بستر با قطر متوسط ۰/۹۱ میلی‌متر و با انحراف معیار ۱/۳۸ استفاده شده است. نسبت سرعت به سرعت آستانه ذرات (U/U_{cr}) برابر ۰/۹۵ و عمق آب (y) ۱۵ سانتی‌متر بوده است. نمایی از آب‌شکن‌های اصلی و آب‌شکن محافظ و پارامترهای هندسی به کار رفته در مطالعات کرمی در شکل ۱ نشان داده شده است. X فاصله آب‌شکن محافظ از اولین آب‌شکن اصلی، L_f طول آب‌شکن اصلی، L_p طول مفید آب‌شکن محافظ، θ زاویه آب‌شکن محافظ نسبت به بالادست است. پارامترهای بی‌بعد شده مورد بررسی در این مطالعه و سطوح هر یک در جدول ۱ آورده شده‌اند.

همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود کرمی در مطالعات خود دو فاکتور را در چهار سطح و یک فاکتور را در سه سطح مورد بررسی قرار داده است. بنابراین ایشان مطالعات خود را در حالت فاکتوریل کامل و با ۴۸ آزمایش ($4 \times 3 \times 4$) انجام داده است. این در حالی است که چنانچه طراحی آزمایش‌ها با استفاده از روش تاگوچی صورت بگیرد می‌توان تعداد آزمایش‌ها را به‌نحو چشمگیری کاهش داد. با توجه به آنکه آرایه متعامد منطبق بر فاکتورها و سطوح ($4 \times 3 \times 4$) این مطالعه در میان الگوهای پیشنهادی روش تاگوچی موجود نیست با استفاده از تکرار سطح سوم فاکتور زاویه آب‌شکن محافظ (زاویه ۱۳۵ درجه) تعداد سطوح این فاکتور به چهار تبدیل شده است ($4 \times 4 \times 4$) و بدین ترتیب از آرایه متعامد L_{16} پیشنهاد شده توسط روش تاگوچی

۰/۷۵ طول آب‌شکن اصلی باشد (۲). کرمی در سال ۲۰۱۱ مطالعه آزمایشگاهی را در حالت فاکتوریل کامل روی محافظت از یک سری سه‌تایی از آب‌شکن‌های اصلی با استفاده از آب‌شکن محافظ انجام دادند و در نهایت پارامترهای هندسی بهینه برای آب‌شکن محافظ را گزارش کردند (۶). واقفی و همکاران به بررسی عددی الگوی جریان حول آب‌شکن T شکل محافظت شده با یک آب‌شکن محافظ در سه حالت دافع، قائم و جاذب در قوس ۹۰ درجه یک کانال پرداختند. ایشان عنوان کردند که با افزایش زاویه آب‌شکن محافظ نسبت به حالت قائم چه در حالت جاذب و چه در حالت دافع، مقادیر ماکزیمم سرعت در محدوده آب‌شکن اصلی افزایش می‌یابد و این افزایش برای حالت دافع بیشتر است (۲۱).

همان‌طور که با مروری بر مطالعات پیشین دیده می‌شود به‌نظر می‌رسد که روش تاگوچی و همچنین روش تاگوچی- GRA در مطالعات هیدرولیک و آبشستگی در موارد معدودی استفاده شده‌اند. همچنین بر اساس مطالعات نویسندگان، تاکنون از این دو روش در بهینه‌سازی پارامترهای هندسی روش‌های محافظت از آبشستگی موضعی سازه‌های قرار گرفته درون آب استفاده نشده است. به دلیل تأثیر زیادی که روش تاگوچی می‌تواند در کاهش زمان و هزینه مطالعات برای یافتن حالت بهینه داشته باشد، قسمت اول این مطالعه به بررسی توانایی این روش در پیش‌بینی سطوح بهینه پارامترهای هندسی آب‌شکن محافظ در مقایسه با روش فاکتوریل کامل به‌کار رفته در مطالعات کرمی (۶) می‌پردازد. در این قسمت تنها تابع پاسخ درصد کاهش عمق ماکزیمم آب‌شکن اول ($R_{SD1}/\%$) در نظر گرفته شده و آنالیز داده‌ها توسط روش تاگوچی صورت پذیرفته است. در قسمت دوم این مطالعه دو تابع پاسخ ($R_{SD1}/\%$) و متوسط درصد کاهش ماکزیمم عمق آبشستگی در اطراف کلیه آب‌شکن‌های اصلی ($R_{AV}/\%$) مدنظر قرار گرفته است. بنابراین از روش تاگوچی به‌همراه روش GRA استفاده شده است که توانایی بررسی چند تابع پاسخ و تبدیل آنها به یک تابع پاسخ را دارا است.



شکل ۱. نمایی از سری آبشکن‌ها و آبشکن محافظ در مدل کرمی (۶)

جدول ۱. فاکتورهای مورد بررسی و سطوح تغییرات آنها

سطوح فاکتورها				فرم بی‌بعد شده فاکتور	فاکتور
۴	۳	۲	۱		
۰/۸	۰/۶	۰/۴	۰/۲	L_p/L_f	طول آبشکن محافظ
۱۳۵	۱۳۵	۹۰	۴۵	θ	زاویه آبشکن محافظ
۲/۵	۲	۱/۵	۱	X/L_f	فاصله آبشکن محافظ

$$(M) \text{ Level} = i = \frac{1}{n} \sum \left[(f) \text{ Level} = i \right] \text{ Factor} = I \quad (1)$$

nI تعداد دفعات ظهور فاکتور I در سطح i است و f_x داده‌های مشاهداتی آزمایشگاهی بر اساس الگوی پیشنهادی تاگوچی (در این مطالعه L_{16}) است.

روش دوم، روش آنالیز نسبت سیگنال به نویز است که در آن انحراف‌های ممکن بین داده آزمایشگاهی و مقدار مطلوب را به کمک یک تابع ضرر مدل‌سازی می‌کند. مقدار این تابع با توجه به ماهیت تابع پاسخ از میان سه حالت هرچه بیشتر بهتر، هرچه کمتر بهتر و هرچه به مقدار اسمی نزدیک‌تر بهتر انتخاب می‌شود. از آنجا که در این مطالعه تابع پاسخ درصد کاهش آبشستگی است، تابع ضرر برای حالت هر چه بیشتر بهتر و بر اساس رابطه (۲) به نسبت سیگنال به نویز تبدیل می‌شود (۱۳ و ۱۶):

استفاده شده است (جدول ۲). قابل ذکر است که در این مطالعه به منظور طراحی آزمایش‌ها و آنالیز نتایج از نرم‌افزار مینی‌تب ۱۷ استفاده شده است.

روش آنالیز

روش تاگوچی

روش تاگوچی کیفیت را بر اساس انحراف از مقدار مطلوب بیان کرده و دو روش را برای آنالیز داده‌ها پیشنهاد می‌دهد. روش اول روش استاندارد است که نتایج حاصل از تنها یک‌بار انجام آزمایش‌ها را با استفاده از آنالیز میانگین ANOM (Analysis Of Mean) بهینه‌سازی می‌کند. بدین منظور در ابتدا با استفاده از رابطه (۱) مقادیر میانگین برای هر فاکتور در هر سطح محاسبه می‌شود و سپس سطح بهینه هر فاکتور و همچنین ترکیب بهینه آنها با استفاده از جدول‌ها و نمودارهای پاسخ تعیین می‌شود (۱۶ و ۱۷).

جدول ۲. آرایه متعامد L۱۶

شماره آزمایش	Lp/Lf	θ	X/Lf
۱	۱	۱	۱
۲	۱	۲	۲
۳	۱	۳	۳
۴	۱	۴	۴
۵	۲	۱	۲
۶	۲	۲	۱
۷	۲	۳	۴
۸	۲	۴	۳
۹	۳	۱	۳
۱۰	۳	۲	۴
۱۱	۳	۳	۱
۱۲	۳	۴	۲
۱۳	۴	۱	۴
۱۴	۴	۲	۳
۱۵	۴	۳	۲
۱۶	۴	۴	۱

که در آن SS_F جمع مربعات برای فاکتور f ام و SS_T مجموع مربعات تمامی فاکتورها است (۱۹).

$$\frac{S}{N} = -10 \times \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (2)$$

که در آن n تعداد تکرار آزمایش‌ها و y داده‌های آزمایشگاهی برای تابع پاسخ مورد بررسی است. در مرحله بعد با جایگذاری f_x در رابطه (۱) با مقادیر سیگنال به نویز، متوسط مقادیر نسبت سیگنال به نویز داده‌ها برای هر فاکتور در هر سطح به دست آمد و در نهایت با استفاده از آنالیز میانگین (ANOM) حالت بهینه تعیین می‌شود.

برای مشخص کردن میزان مشارکت هر فاکتور بر آبشستگی در ابتدا لازم است تا آنالیز واریانس ANOVA انجام پذیرد و سپس با استفاده از رابطه زیر درصد مشارکت هر فاکتور در کاهش آبشستگی قابل محاسبه خواهد بود (۱۳).

$$\% \text{contribution of factor} = \frac{SS_F}{SS_T} \times 100 \quad (3)$$

روش GRA

برای استفاده از این روش سه مرحله محاسبه باید انجام پذیرد: ۱- محاسبه GRN (Grey Relational generation) ۲- محاسبه GRC (Grey Relational Coefficient) ۳- محاسبه GRG (Grey Relational Grade). در ادامه روابط مورد نیاز هر سه مرحله گفته شده آورده شده است.

محاسبه GRN

در این روش در ابتدا مقادیر توابع پاسخ حاصل از آزمایش‌ها بین صفر تا یک بی‌بعد و مرتب می‌شوند. این کار به منظور وزن‌دهی یکسان به توابع پاسخ مختلف و هم‌بعدسازی آنها

میانگین گیری می شود تا برای هر ترکیب مقدار GRG حاصل شود (۵):

$$\gamma_{0,i} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \gamma_{0,i}(k) \quad (9)$$

در این رابطه برای تمامی توابع پاسخ وزن یکسان در نظر گرفته شده است. چنانچه آزمایش ها بر اساس روش طراحی تاگوچی انجام شده باشند، لازم است روی مقادیر GRG آنالیز ANOM انجام گیرد. بدین ترتیب بهینه ترین سطوح و ترکیبات فاکتورها برای تمامی حالات ممکن به دست می آید. در پایان به منظور تعیین فاکتورهای مؤثر و نسبت مشارکت هر یک در آبستگی آنالیز ANOVA انجام می شود.

در این مطالعه به منظور صحت سنجی هر دو روش گفته شده، نتایج بهینه سازی حاصل از آنها با نتایج بهینه سازی کرمی (۶) در حالت فاکتوریل کامل مقایسه شده است.

نتایج و بحث

بهینه سازی با یک تابع پاسخ و استفاده از روش تاگوچی

داده های آزمایشگاهی ($R_{SD1}\%$) به دست آمده از مطالعات کرمی (۶) در مقابل ۱۶ آزمایش طراحی شده توسط تاگوچی در جدول ۳ آورده شده است. به منظور مقایسه نتایج، آنالیز با استفاده از هر دو روش استاندارد و سیگنال به نویز صورت گرفته است. بنابراین در ابتدا با استفاده از رابطه (۲) و بر اساس معیار کیفیت هر چه بیشتر بهتر، مقادیر سیگنال به نویز محاسبه شده است. سپس به منظور تعیین اثر فاکتورها با استفاده از آنالیز ANOM و رابطه (۱) برای مقادیر آزمایشگاهی و نسبت های سیگنال به نویز آنها، به ترتیب جدول ۴ و جدول ۵ حاصل شده اند. در این جدول ها اعداد تیره تر نشان دهنده سطوح بهینه هر فاکتور هستند. شکل های ۲ و ۳ تأثیر تغییرات سطوح فاکتورها بر $R_{SD1}\%$ را نشان می دهند. مطابق این شکل ها سطوح بهینه فاکتورها (مقادیر ماکزیمم نمودارها) حاصل از ۱۶ آزمایش طراحی شده توسط روش تاگوچی به صورت $X/L_f = 2/5$ ، $\theta = 90^\circ$ و

(چنانچه هم واحد نباشند) صورت می گیرد. بدین منظور با توجه به معیار بهینه بودن هر تابع پاسخ و با انتخاب یکی از روابط کمینه شدن، بیشینه شدن و به یک مقدار خاص رسیدن مقادیر توابع پاسخ بی بعد می شوند. با توجه به هدف این مطالعه که بیشینه کردن درصد کاهش آبستگی است رابطه زیر به منظور محاسبه GRN به کار رفته است (۵):

$$x_i(k) = \frac{y_i(k) - \min y_i(k)}{\max y_i(k) - \min y_i(k)} \quad (4)$$

$x_i(k)$ مقدار بی بعد شده، $y_i(k)$ مقدار اندازه گیری شده برای تابع k ام است $\min y_i(k)$ و $\max y_i(k)$ به ترتیب کمترین و بیشترین مقدار $y_i(k)$ در کل مطالعات انجام شده است. در این مطالعه دو تابع پاسخ بررسی می شود پس k برابر ۱ و یا ۲ بوده و با توجه به انتخاب الگوی L_{16} ، i عددی بین ۱ تا ۱۶ است.

محاسبه GRC

برای نشان دادن ارتباط بین مقادیر بی بعد شده تابع پاسخ $x_i(k)$ و مقدار ایده آل تابع پاسخ بی بعد شده، یعنی $x_0(k) = 1$ لازم است که مقدار GRC از طریق رابطه زیر محاسبه شود (۵):

$$\gamma_{0,i}(k) = \frac{\Delta_{\min} + \zeta \Delta_{\max}}{\Delta_{0,i}(k) + \zeta \Delta_{\max}} \quad (5)$$

$$\Delta_{0,i}(k) = \|x_0(k) - x_i(k)\| \quad (6)$$

$$\Delta_{\min} = \min_{\forall j \in i} \min_{\forall k} \|x_0(k) - x_j(k)\| \quad (7)$$

$$\Delta_{\max} = \max_{\forall j \in i} \max_{\forall k} \|x_0(k) - x_j(k)\| \quad (8)$$

ζ عددی بین صفر تا یک است و معمولاً برابر ۰/۵ در نظر گرفته می شود (۵).

محاسبه GRG

برای آنکه چند تابع پاسخ تبدیل به یک تابع پاسخ شود از مقادیر GRC به دست آمده در مرحله قبل طبق رابطه زیر

جدول ۳. داده‌های آزمایشگاهی توابع پاسخ

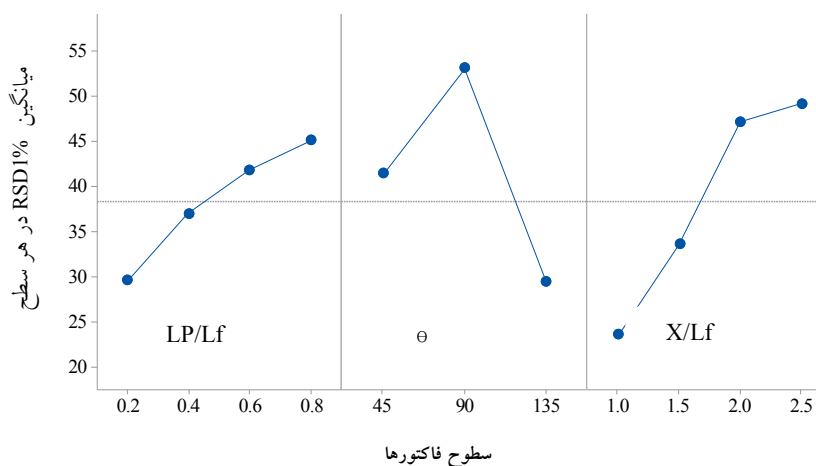
شماره آزمایش	L_p/L_f	θ	X/L_f	$R_{SD,1}/\%$	$(\%)R_{AV}$
۱	۰/۲	۴۵	۱	۱۵/۷	۲۸/۱
۲	۰/۲	۹۰	۱/۵	۳۵/۶	۵۵/۳
۳	۰/۲	۱۳۵	۲	۳۳/۵	۴۳/۹
۴	۰/۲	۱۳۵	۲/۵	۳۳/۵	۴۰/۸
۵	۰/۴	۴۵	۱/۵	۴۰/۶	۵۷/۲
۶	۰/۴	۹۰	۱	۳۷/۴	۴۳/۷
۷	۰/۴	۱۳۵	۲/۵	۳۸/۸	۵۶/۴
۸	۰/۴	۱۳۵	۲	۳۱	۴۷/۵
۹	۰/۶	۴۵	۲	۵۰/۵	۷۲/۵
۱۰	۰/۶	۹۰	۲/۵	۶۵/۵	۷۵
۱۱	۰/۶	۱۳۵	۱	۲۴/۶	۲۲/۶
۱۲	۰/۶	۱۳۵	۱/۵	۲۶/۷	۳۴
۱۳	۰/۸	۴۵	۲/۵	۵۸/۷	۷۲/۶
۱۴	۰/۸	۹۰	۲	۷۳/۷	۵۵/۲
۱۵	۰/۸	۱۳۵	۱/۵	۳۱/۳	۳۵/۸
۱۶	۰/۸	۱۳۵	۱	۱۶/۷	۲۱/۵

جدول ۴. مقادیر میانگین ماکزیمم عمق آبستگي برای هر فاکتور در هر سطح

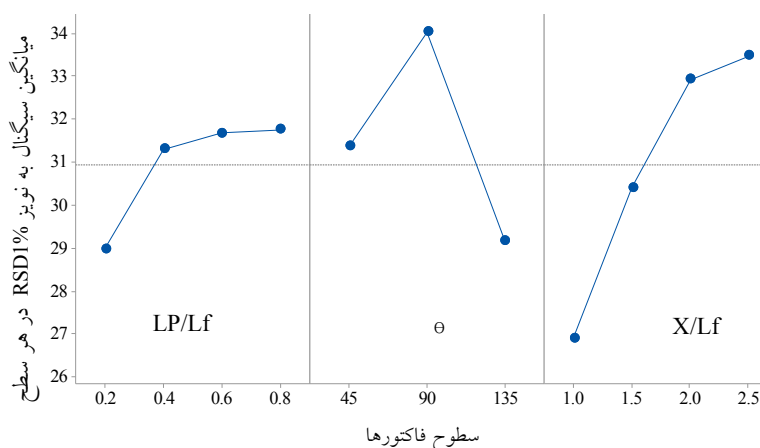
سطح فاکتور	L_p/L_f	θ	X/L_f
۱	۲۹/۵۷	۴۱/۳۸	۲۳/۶
۲	۳۶/۹۵	۵۳/۰۵	۳۳/۵۵
۳	۴۱/۸۲	۲۹/۵۱	۴۷/۱۷
۴	۴۵/۱۰		۴۹/۱۳
Δ	۱۵/۵۳	۲۳/۵۴	۲۵/۵۳
Rank	۳	۲	۱

جدول ۵. مقادیر میانگین نسبت سیگنال به نویز برای هر فاکتور در هر سطح

سطح فاکتور	L_p/L_f	θ	X/L_f
۱	۲۸/۹۹	۳۱/۳۸	۲۶/۹۱
۲	۳۱/۳۱	۳۴/۰۴	۳۰/۴۱
۳	۳۱/۶۸	۲۹/۱۶	۳۲/۹۴
۴	۳۱/۷۷		۳۳/۴۹
Δ	۲/۷۸	۴/۸۸	۶/۵۸
Rank	۳	۲	۱



شکل ۲. نمودار تأثیر فاکتورها بر $RSD_1\%$ با استفاده از مقادیر میانگین داده‌ها



شکل ۳. نمودار تأثیر فاکتورها بر $RSD_1\%$ با استفاده از سیگنال به نویز داده‌ها

به منظور تعیین فاکتورهای مؤثر و میزان مشارکت هر یک بر تابع پاسخ، نتایج آنالیز واریانس در جدول ۶ آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد که بیشترین درصد مشارکت بر کاهش آبشستگی مربوط به فاصله آبشکن محافظ از آبشکن‌های اصلی است که بر طبق آنالیز واریانس مقادیر میانگین آزمایشگاهی، برابر $43/25$ درصد و بر طبق آنالیز واریانس مقادیر سیگنال به نویز، برابر $51/06$ درصد است. از آنجا که در این پژوهش مقادیر P-value کوچک‌تر از $0/05$ نشان‌دهنده مؤثر بودن فاکتور در نظر گرفته شده‌اند، بر اساس آنالیز واریانس مقادیر میانگین، هر سه فاکتور و بر اساس آنالیز واریانس سیگنال به نویز دو فاکتور فاصله و

$L_p/L_f = 0/8$ است که با نتایج حاصل از ۴۸ آزمایش کرمی (۶) که ترکیب بهینه بر اساس تابع پاسخ $RSD_1\%$ را به صورت $L_p/L_f = 0/8$ ، $\theta = 90^\circ$ ، $X/L_f = 2/5$ گزارش کرده است، کاملاً مطابقت دارد. در جدول‌های گفته شده ماکزیمم تغییرات مقادیر (Δ) برای هر ستون آورده شده است. مقادیر بیشتر Δ نشان‌دهنده تأثیرگذاری بیشتر آن فاکتور بر کاهش آبشستگی است. بنابراین می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که فاکتور فاصله آبشکن محافظ از اولین آبشکن اصلی، زاویه آبشکن محافظ و طول آبشکن محافظ به ترتیب بیشترین تأثیر را بر کاهش ماکزیمم عمق آبشستگی آبشکن اول دارا هستند.

جدول ۶. نتایج آنالیز ANOVA و درصد مشارکت محاسبه شده برای هر فاکتور

درصد مشارکت	P	F	Adj Ms	Adj SS _F	SS _F	DF	فاکتور	روش آنالیز
۱۳/۵۹	۰/۰۲۳	۶/۱	۱۸۲/۱۳	۵۴۶/۴۰	۵۴۶/۴۰	۳	L _p /L _f	آنالیز بر اساس مقادیر میانگین داده‌ها
۳۷/۹۶	۰/۰۰۱	۲۵/۵۵	۷۶۲/۸۹	۱۵۲۵/۸۰	۱۵۲۵/۸۰	۲	θ	
۴۳/۲۵	۰/۰۰۱	۱۹/۴۱	۵۷۹/۴۴	۱۷۳۸/۳۰	۱۷۳۸/۳۰	۳	X/L _f	
			۲۹/۸۶	۲۰۹/۰۰	۲۰۹/۰۰	۷	residual Error	
					۴۰۱۹/۵۰	۱۵	Total	
R-Sq = ۹۴/۸ % R-Sq(adj) = ۸۸/۹%								
۹/۸۲	۰/۱۳۱	۲/۶۴	۶/۹۲۸	۲۰/۷۸	۲۰/۷۸	۳	L _p /L _f	آنالیز بر اساس مقادیر سیگنال به نویز داده‌ها
۳۰/۴۵	۰/۰۰۵	۱۲/۳	۳۲/۲۱۵	۶۴/۴۳	۶۴/۴۳	۲	θ	
۵۱/۰۶	۰/۰۰۳	۱۳/۷۵	۳۶/۰۱۳	۱۰۸/۰۴	۱۰۸/۰۴	۳	X/L _f	
			۲/۶۲	۱۸/۳۴	۱۸/۳۴	۷	residual Error	
					۲۱۱/۵۹	۱۵	Total	
R-Sq = ۹۱/۳% R-Sq(adj) = ۸۱/۴%								

مقادیر GRN، GRC و GRG برای هر دو تابع پاسخ با استفاده از روابط (۴) تا (۹) محاسبه و در جدول ۷ نشان داده شده‌اند. مقادیر بیشتر GRG نشان می‌دهد که ترکیب مربوطه به مقدار بهینه نزدیک‌تر است (۹). این در حالی است که این نتیجه تنها در مورد ۱۶ آزمایش انجام شده صحت دارد. برای آنکه تأثیر تمامی سطوح فاکتورها و تمامی ترکیبات ممکن آنها در تعیین حالت بهینه در نظر گرفته شود، مشابه با آنچه در بخش قبلی گفته شد از هر دو روش آنالیز تاگوچی نمودارهای پاسخ به دست آمده‌اند. گفتنی است که در اینجا به دلیل مشابهت روند نمودار پاسخ حاصل از آنالیز سیگنال به نویز با نمودار پاسخ حاصل از آنالیز میانگین (شکل ۴)، از آوردن آن خودداری شده است. همان‌طور که در شکل ۴ دیده می‌شود ترکیب بهینه از سطوح فاکتورهای مورد بررسی آب‌شکن محافظ در این مطالعه با در نظر گرفتن دو تابع پاسخ گفته شده به صورت $X/L_f = 2/5$ ، $\theta = 90^\circ$ و

زاویه آب‌شکن محافظ مؤثر هستند و فاکتور طول آب‌شکن مؤثر نبوده است.

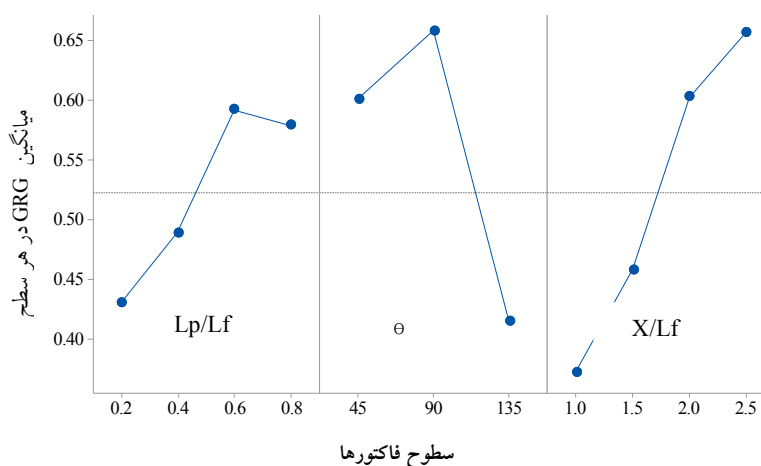
بهینه‌سازی با دو تابع پاسخ و استفاده از روش تاگوچی -

GRA

در بخش دوم این مطالعه برای تعیین پارامترهای هندسی بهینه برای آب‌شکن محافظ، دو تابع پاسخ ($R_{SD1}/\%$) و ($R_{AV}/\%$) مورد توجه قرار گرفته است. همان‌طور که در مقدمه گفته شد روش تاگوچی توانایی تحلیلی بیش از یک تابع پاسخ را ندارد، بنابراین در این قسمت از روش GRA در کنار روش تاگوچی استفاده شد تا بتوان حالت بهینه بر اساس هر دو تابع پاسخ را به دست آورد. بدین منظور همانند قسمت قبل از الگوی L_{16} پیشنهاد شده توسط روش تاگوچی استفاده شده است. نتایج آزمایشگاهی کرمی (۶) متناظر برای هر دو تابع پاسخ $R_{SD1}/\%$ و $R_{AV}/\%$ در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۷. مقادیر GRN، GRC و GRG محاسبه شده برای هر دو تابع پاسخ مورد بررسی

GRG	GRC				GRN		شماره آزمایش
	$\gamma_{0,i}$	$\gamma_{0,i}(2)$	$\gamma_{0,i}(1)$	$\Delta_{0,i}(2)$	$\Delta_{0,i}(1)$	$x_i(2)$	
۰/۳۴۸۳	۰/۳۶۳۲	۰/۳۳۳۳	۰/۸۷۶۶	۱/۰۰۰۰	۰/۱۲۳۴	۰/۰۰۰۰	۱
۰/۵۰۴۰	۰/۵۷۵۹	۰/۴۳۲۲	۰/۳۶۸۲	۰/۶۵۶۹	۰/۶۳۱۸	۰/۳۴۳۱	۲
۰/۴۴۰۷	۰/۴۶۲۴	۰/۴۱۹۱	۰/۵۸۱۳	۰/۶۹۳۱	۰/۴۱۸۷	۰/۳۰۶۹	۳
۰/۴۲۹۰	۰/۴۳۸۹	۰/۴۱۹۱	۰/۶۳۹۳	۰/۶۹۳۱	۰/۳۶۰۷	۰/۳۰۶۹	۴
۰/۵۳۳۷	۰/۶۰۰۴	۰/۴۶۷۰	۰/۳۳۲۷	۰/۵۷۰۷	۰/۶۶۷۳	۰/۴۲۹۳	۵
۰/۴۵۲۵	۰/۴۶۰۸	۰/۴۴۴۱	۰/۵۸۵۰	۰/۶۲۵۹	۰/۴۱۵۰	۰/۳۷۴۱	۶
۰/۵۲۱۸	۰/۵۸۹۹	۰/۴۵۳۸	۰/۳۴۷۷	۰/۶۰۱۷	۰/۶۵۲۳	۰/۳۹۸۳	۷
۰/۴۴۸۸	۰/۴۹۳۱	۰/۴۰۴۵	۰/۵۱۴۰	۰/۷۳۶۲	۰/۴۸۶۰	۰/۲۶۳۸	۸
۰/۷۳۵۰	۰/۹۱۴۵	۰/۵۵۵۶	۰/۰۴۶۷	۰/۴۰۰۰	۰/۹۵۳۳	۰/۶۰۰۰	۹
۰/۸۸۹۸	۱/۰۰۰۰	۰/۷۷۹۶	۰/۰۰۰۰	۰/۱۴۱۴	۱/۰۰۰۰	۰/۸۵۸۶	۱۰
۰/۳۵۴۶	۰/۳۳۸۰	۰/۳۷۱۳	۰/۹۷۹۴	۰/۸۴۶۶	۰/۰۲۰۶	۰/۱۵۳۴	۱۱
۰/۳۸۸۲	۰/۳۹۴۸	۰/۳۸۱۶	۰/۷۶۶۴	۰/۸۱۰۳	۰/۲۳۳۶	۰/۱۸۹۷	۱۲
۰/۷۸۸۴	۰/۹۱۷۷	۰/۶۵۹۱	۰/۰۴۴۹	۰/۲۵۸۶	۰/۹۵۵۱	۰/۷۴۱۴	۱۳
۰/۷۸۷۳	۰/۵۷۴۷	۱/۰۰۰۰	۰/۳۷۰۱	۰/۰۰۰۰	۰/۶۲۹۹	۱/۰۰۰۰	۱۴
۰/۴۰۵۹	۰/۴۰۵۶	۰/۴۰۶۲	۰/۷۳۲۷	۰/۷۳۱۰	۰/۲۶۷۳	۰/۲۶۹۰	۱۵
۰/۳۳۵۳	۰/۳۳۳۳	۰/۳۳۷۲	۱/۰۰۰۰	۰/۹۸۲۸	۰/۰۰۰۰	۰/۰۱۷۲	۱۶



شکل ۴. نمودار تأثیر فاکتورها بر GRG

فاکتور طول آبشکن محافظ است که روش تاگوچی - GRA سطح سوم این فاکتور یعنی ۰/۶ را بهینه می‌داند در حالی که در روش تاگوچی سطح چهارم آن یعنی ۰/۸ بهینه‌ترین سطح به دست آمده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که چنانچه علاوه بر

$L_p/L_f=0/6$ است که با نتایج گزارش شده توسط کرمی (۲/۵ یا ۲) X/L_f ، $\theta=90^\circ$ یا 45° و $L_p/L_f=0/6$ (بر اساس همان دو تابع پاسخ، مطابقت دارد (۶). این ترکیب به نتیجه بخش قبل (بهینه‌سازی با یک تابع پاسخ) بسیار نزدیک است و تنها تفاوت در

جدول ۸. نتایج آنالیز ANOVA و درصد مشارکت محاسبه شده برای هر فاکتور

درصد مشارکت	P	F	Adj Ms	AdjSS _F	SS _F	DF	فاکتور	روش آنالیز
۱۴/۹۱	۰/۰۰۰	۲۴/۶۶	۰/۰۲۳۵	۰/۰۷۰۴	۰/۰۷۰۴	۳	L _p /L _f	
۴۰/۲۸	۰/۰۰۰	۹۹/۹۱	۰/۰۹۵۱	۰/۱۹۰۳	۰/۱۹۰۳	۲	θ	آنالیز بر اساس
۴۳/۴۰	۰/۰۰۰	۷۱/۷۷	۰/۰۶۸۳	۰/۲۰۵۰	۰/۲۰۵۰	۳	X/L _f	مقادیر میانگین داده‌ها
			۰/۰۰۱۰	۰/۰۰۶۷	۰/۰۰۶۷	۷	residual Error	
					۰/۴۷۲۴	۱۵	Total	
R-Sq = ۹۸/۶% R-Sq(adj) = ۹۷%								
۱۰/۷۲	۰/۰۰۱	۱۷/۸۸	۳/۹۸۳۱	۱۱/۹۴۹	۱۱/۹۴۹	۳	L _p /L _f	
۴۰/۲۲	۰/۰۰۰	۱۰۰/۶۳	۲۲/۴۱۱	۴۴/۸۲۲	۴۴/۸۲۲	۲	θ	آنالیز بر اساس
۴۷/۶۶	۰/۰۰۰	۷۹/۴۹	۱۷/۷۰۴۲	۵۳/۱۱۳	۵۳/۱۱۳	۳	X/L _f	مقادیر سیگنال به نویز داده‌ها
			۰/۲۲۲۷	۱/۵۵۹	۱/۵۵۹	۷	residual Error	
					۱۱۱/۴۴۳	۱۵	Total	
R-Sq = ۹۸/۶% R-Sq(adj) = ۹۷%								

نتیجه‌گیری

در این پژوهش سعی شده تا پارامترهای هندسی آب‌شکن محافظ با استفاده از روش‌های طراحی آزمایش‌ها و با بررسی تعداد کمتری از آزمایش‌ها نسبت به حالت فاکتوریل کامل تعیین شود. در قسمت اول این مطالعه بهینه‌سازی بر اساس یک تابع پاسخ درصد کاهش ماکزیم عمق آبشستگی آب‌شکن اول از آب‌شکن‌های اصلی و با استفاده از روش تاگوجی صورت گرفت. ترکیب بهینه پیش‌بینی شده به صورت $X/L_f = 2/5$ ، $\theta = 90^\circ$ و $L_p/L_f = 0/8$ است که با نتایج مطالعات کرمی (۶) برای همان تابع پاسخ کاملاً مطابقت دارد. در قسمت دوم مطالعه، علاوه بر درصد کاهش ماکزیم عمق آبشستگی آب‌شکن اول، درصد کاهش عمق آبشستگی در اطراف کلیه آب‌شکن‌های اصلی نیز به‌عنوان تابع پاسخ دوم در نظر گرفته شده و بهینه‌سازی به‌وسیله استفاده همزمان از روش ترکیبی

کاهش عمق ماکزیم آب‌شکن اول، کاهش عمق آبشستگی در تمامی آب‌شکن‌های اصلی هم مدنظر باشد می‌توان از آب‌شکن محافظ کوتاه‌تر استفاده کرد این موضوع علاوه بر اقتصادی‌تر شدن طراحی، منجر به کاهش تنگ‌شدگی مقطع در محل آب‌شکن محافظ می‌شود و بنابراین آب‌شکن محافظ آبشستگی کمتری را در اطراف خود خواهد داشت.

به‌منظور تعیین پارامترهای مؤثر بر درصد کاهش آبشستگی همچنین درصد مشارکت هر فاکتور آنالیز واریانس صورت گرفته و نتایج آن در جدول ۸ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود هر سه فاکتور مورد بررسی در این پژوهش دارای P-value کمتر از ۰/۰۵ هستند و بنابراین هر سه مؤثر هستند. همچنین مشاهده می‌شود که مشابه با بخش قبلی بیشترین درصد مشارکت (۴۷/۶۶ و یا ۴۳/۴۰) مربوط به فاکتور فاصله آب‌شکن محافظ از آب‌شکن‌های اصلی است.

محافظ را خواهند داشت. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که روش تاگوچی و همچنین روش ترکیبی تاگوچی - GRA توانایی بالایی در پیش‌بینی حالت بهینه دارند و بنابراین می‌توانند مورد استفاده در طراحی‌های مهندسان هیدرولیک واقع شده و با کاهش تعداد آزمایش‌های لازم، رسیدن به حالت بهینه را آسان‌تر، سریع‌تر و مقرون به صرفه کنند.

تاگوچی - GRA انجام پذیرفته است. نتیجه بهینه‌سازی به صورت $X/L_f = 2/5$ ، $\theta = 90^\circ$ و $L_p/L_f = 0/6$ است که با نتایج کرمی برای همان دو تابع پاسخ مطابقت دارد. همچنین با استفاده از آنالیز واریانس مشخص شد که هر سه پارامتر هندسی مورد بررسی آب‌شکن محافظ مؤثر بوده و فاکتور فاصله آب‌شکن، زاویه آب‌شکن و طول آب‌شکن به ترتیب بیشترین درصد مشارکت در کاهش آبشستگی با استفاده از آب‌شکن

منابع مورد استفاده

1. Ai, L., G. Zhang, W. Li, G. Liu and Q. Liu. 2018. Optimization of radial-type superconducting magnetic bearing using the Taguchi method. *Physica C: Superconductivity and its Applications* 550: 57-64.
2. Andarvaj, A. 1997. Measure to control erosion at groyne. MSc. Thesis, University of Tehran, Iran. (In Farsi).
3. Chiang, Y. M. and H. H. Hsieh. 2009. The use of the Taguchi method with grey relational analysis to optimize the thin-film sputtering process with multiple quality characteristic in color filter manufacturing. *Computers and Industrial Engineering* 56(2): 648-661.
4. Gisonni, C. and W. H. Hager. 2008. Spur failure in river engineering. *Journal of Hydraulic Engineering* 134(2): 135-145.
5. Jeffrey Kuo, C. F., T. L. Su, P. R. Jhang, C. Y. Huang and C. H. Chiu. 2011. Using the Taguchi method and grey relational analysis to optimize the flat-plate collector process with multiple quality characteristics in solar energy collector manufacturing. *Energy* 36(5): 3554-3562.
6. Karami, H. 2011. Effect of protective spur dike on reduction of local scour around spur dikes (Experimental investigation). Ph.D. Thesis, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran. (In Farsi).
7. Karami, H., A. Ardeshir, K. Behzadian and M. Ghodsian. 2011. Protective spur dike for scour mitigation of existing spur dikes. *Journal of Hydraulic Research* 49(6): 809-813.
8. Katata-Seru, L., T. C. Lebepe, O. S. Aremu and I. Bahadur. 2017. Application of Taguchi method to optimize garlic essential oil nanoemulsions. *Journal of Molecular Liquids* 244: 279-284.
9. Kuo, Y., T. Yang and G. W. Huang. 2008. The use of a grey-based Taguchi method for optimizing multi-response simulation problems. *Engineering Optimization* 40(6): 517-528.
10. Lin, C. L. 2004. Use of the Taguchi Method and grey relational analysis to optimize turning operations with multiple performance characteristics. *Materials and Manufacturing Processes* 19(2) 209-220.
11. Lin, J. L. and C. L. Lin. 2002. The use of the orthogonal array with grey relational analysis to optimize the electrical discharge machining process with multiple performance characteristics. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 42(2): 237-244.
12. Pagliara, S. and M. Palermo. 2008. Plane plunge pool scour with protection structures. *Journal of Hydro-Environment Research* 2(3): 182-191
13. Phadke, M. S. 1989. Quality Engineering Using Robust Design.: Prentice Hall PTR, New Jersey.
14. Rostamabadi, M., A. A. Salehi Neyshabouri and A. R. Zarrati. 2013. Application of taguchi method in the study of optimum position of scour protection structures for plunging flow. *Iranian Journal of Water and Environment Engineering* 1(2): 35-46. (In Farsi).
15. Rostamabadi, M., A. A. Salehi Neyshabouri and A. R. Zarrati. 2013. Optimization of Geometric Parameters of Submerged Vane in Straight Alluvial Channel With Taguchi Method and GRA. *Modares Civil Engineering Journal* 13(2): 79-94. (In Farsi).
16. Roy, R. K. 2010. A primer on the Taguchi method. Society of Manufacturing Engineers, Dearborn.
17. Sadeghi, S. H., V. Moosavi, A. Karami and N. Behnia. 2012. Soil erosion assessment and prioritization of affecting factors at plot scale using the Taguchi method. *Journal of Hydrology* 448-449: 174-180.
18. Sadr, P., A. Kolahdooz and S. A. Eftekhari. 2017. The effect of electrical discharge machining parameters on alloy din 1.2080 using the taguchi method and determinant of optimal design of experiments. *Journal of Naval Architecture and Marine Engineering* 14(1): 47-64.
19. Sun, B. Y., J. B. Xiao, Z. B. Li, B. Ma, L. T. Zhang, Y. L. Huang and L. F. Bai. 2017. An analysis of soil

- detachment capacity under freeze-thaw conditions using the Taguchi method. *Catena* 162: 100-107.
20. Tarng, Y. S., S. C. Juang and C. H. Chang. 2002. The use of grey-based Taguchi methods to determine submerged arc welding process parameters in hardfacing. *Journal of Materials Processing Technology* 128(1-3): 1-6.
 21. Vaghefi, M., B. Faraji, M. Akbari and A. Eghbalzadeh. 2018. Numerical investigation of flow pattern around a T-shaped spur dike in the vicinity of attractive and repelling protective structures. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* 40(93): 1-15.
 22. Viswanath Allamraju, K. 2018. Voltage optimization of piezoelectric circular transducer by Taguchi and ANOVA approaches. *Materials Today: Proceedings* 5(2): 5322-5327.
 23. Zhang, J. Z., J. C. Chen and E. D. Kirby. 2007. Surface roughness optimization in an end-milling operation using the Taguchi design method. *Journal of Materials Processing Technology* 184(1): 233-239.

Optimization of the Geometric Parameters of the Protective Spur Dike using Taguchi Method and GRA.

A. Atarodi¹, H. Karami^{1*}, A. Ardeshir² and Kh. Hosseini¹

(Received: February 15-2019; Accepted: June 17-2019)

Abstract

In general, engineering designs need to optimize the factors affecting the under-study phenomenon; however, this is often a costly and time-consuming process. In this regard, new methods have been developed to optimize with fewer tests; thus, they can make the whole process more affordable. In this study, Taguchi and Taguchi-GRA methods were used to design the geometric parameters of the protective spur dike in order to optimize their efficiency in reducing the scouring in a series of spur dikes. The results of both methods showed the optimal ratio of the length of the protective spur dike to the length of the first spur dike was 2.5 and the angle of the protective spur dike was 90 °. However, the ratio of the length of the protective spur dike to the length of the main spur dike in the Taguchi method was 0.8 and in the Taguchi-GRA method, it was 0.6. In addition, using variance analysis showed that the distance between the protective spur dike from the first spur dike, the protective spur dike angle, and the length of the protective spur dike were, respectively, the most effective on the performance of the protective spur dike. The results of this study, therefore, indicate that both methods are highly effective in optimization and, therefore, can be useful in the hydraulic engineer studies.

Keywords: Optimization, Taguchi method, GRA method, Protective spur dike

1. Department of Water Engineering and Hydraulic Structures, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

2. Department of Civil & Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.

*: Corresponding author, Email: hkarami@semnan.ac.ir