

# مقایسه روش های تاگوچی و فاکتوریل کامل در مطالعات پارامتریک الگوی جریان حول آبشکن

معصومه رستم آبادی<sup>۱\*</sup>، ماندانا ناجی ابهری<sup>۲</sup>

۱- استادیار، گروه عمران، واحد بوئین زهرا، دانشگاه آزاد اسلامی، بوئین زهرا، ایران

۲- استادیار، موسسه آموزش عالی اسرار، مشهد

\*Rostamabadi@buinau.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۶/۶/۲۹]

تاریخ دریافت: [۱۳۹۵/۹/۱۰]

## چکیده

در مطالعه پدیده های هیدرولیکی که تابع متغیرهای مختلف با سطوح تغییر متفاوت هستند، باید تمام ترکیبات ممکن (فاکتوریل کامل) آنها بررسی شود. اگر تعداد متغیرها اندک و شمار سطوح آنها کم باشد، انجام مطالعات به تعداد فاکتوریل کامل منطقی است. گاهی اوقات به دلیل مسائل اقتصادی و یا زمانی امکان انجام تعداد زیاد مطالعات وجود ندارد. روش تاگوچی که برای طراحی مطالعات به کار می رود، به جای استفاده از ترکیبات فاکتوریلی کامل از ترکیبات فاکتوریلی جزئی بهره می برد. این روش تعداد مطالعات را کاهش داده ضمن آنکه مقایسه موزون تمام متغیرها را تضمین می کند. هدف از پژوهش حاضر بررسی تأثیر استفاده از روش تاگوچی در مقدار بهینه بدست آمده برای پارامترهای طول آبشکن و موقعیت آن در قوس ۹۰ درجه، در اعداد فرود مختلف، بر هیدرودینامیک جریان حول آبشکن است. همچنین مقایسه ای بین نتایج روش تاگوچی با روش فاکتوریل کامل در تعداد مطالعات، تعیین سطح بهینه هریک از پارامترها و زمان انجام مطالعات صورت گرفته است. بدین منظور برای هریک از پارامترهای طول و موقعیت آبشکن در قوس و عدد فرود، سه سطح تغییر در نظر گرفته شده است. مطالعات با روش های تاگوچی و فاکتوریل کامل طراحی شده و از مدل عددی SSIIM برای انجام آنها استفاده شده است. نتایج نشان داد روش تاگوچی، با ۹ مطالعه به جای ۲۷ مطالعه، با دقت خوب و نزدیک به نتایج طرح فاکتوریل کامل، ترکیب بهینه پارامترها را پیش بینی نموده است. همچنین استفاده از روش تاگوچی منجر به کاهش حدود ۶۶ درصدی در زمان مطالعات شده است.

**واژگان کلیدی:** آبشکن در قوس، روش تاگوچی، فاکتوریل کامل، صرفه جویی مالی و زمانی.

## ۱- مقدمه

متغیرهای هندسی و هیدرولیکی بر عملکرد سازه های هیدرولیکی تأثیرگذارند. معمولاً پژوهشگران برای تعیین ترکیب بهینه متغیرها، برای هر متغیر سطوح مختلفی را در نظر گرفته و تمام ترکیبات ممکن (فاکتوریل کامل) سطوح متغیرها را بررسی می نمایند. تعداد ترکیبات فاکتوریلی کامل برای  $m$

متغیر  $L$  سطحی  $N=L^m$  ( $L>2$ ) است. به عنوان نمونه اگر در بررسی پدیده ای سه متغیر و هریک در چهار سطح مطرح باشد،  $4^3$  یا ۶۴ ترکیب باید بررسی شود. اگر  $m$  و  $N$  کوچک باشند، انجام مطالعات به تعداد فاکتوریل کامل منطقی است، اما گاهی اوقات به دلیل مسائل اقتصادی و یا زمانی، اصلاً امکان انجام تعداد زیاد مطالعات وجود ندارد، بنابراین

ارتفاع نسبی زبری و فاصله نسبی بافلها [6]؛ برای بررسی حذف فنل از محیط‌های آبی با تغییر PH، نسبت مولار پرسولفات به آهن و زمان تماس [7]؛ برای بررسی اثر حرارت و درصدهای مختلف نانوسیلیس بر مقاومت فشاری بتن سبک [8]؛ برای بهسازی زیستی خاک با تغییر غلظت باکتری، نسبت مولارپتیه مواد غذایی، مدت زمان گیرش و نسبت حجمی مواد اضافه شده [9]؛ بررسی اثر تزریق باکتری، اوره و کلرید کلسیم بر تثبیت خاک [10]؛ در تعیین ترکیب بهینه برای تولید بتن سبک نیمه سازه‌ای [11] و برای بررسی تخلخل و مقاومت بتن با تغییر نسبت آب به سیمان و نیز مقدار سیمان [12] از روش تاگوچی در طراحی آزمایشات و تحلیل نتایج استفاده نمودند. تلفیق دو روش تاگوچی و تاکسونومی خاکستری در تأثیر ۱۷ معیار مؤثر بر پیشرفت پروژه‌های عمرانی [13] به کار رفته است. در کلیه موارد فوق روش تاگوچی به عنوان معیار طراحی آزمایشات و نیز تحلیل نتایج استفاده شده است؛ بدون اینکه دقت این روش در نتایج بدست آمده و ترکیب بهینه تعیین شده با آن مورد ارزیابی قرار گیرد. از روش تاگوچی برای پیش بینی خواص بتن‌های سبکدانه ساخته شده از سنگدانه پومیس معدن اسکندران استفاده شد که در آن، علاوه بر انجام آزمایشات در حالت فاکتوریل کامل (۵۴ آزمایش)، طراحی آزمایشات با روش تاگوچی (۹ آزمایش) نیز انجام شد و خطای روش تاگوچی در پیش‌بینی مقاومت‌های ۷، ۲۸ و ۹۱ روزه حداکثر ۱۳/۹ درصد بدست آمد [14]. در تعیین زمان تأخیر ترافیک در شبکه راه‌ها، روش تاگوچی با طرح فاکتوریل کامل مقایسه شد و نتیجه گرفته شد در روش تاگوچی راحت‌تر از طرح فاکتوریل کامل، اثر متقابل عوامل درگیر قابل تعیین است [15]. از روش طراحی مطالعات تاگوچی به منظور بهینه‌سازی شاخص‌های هندسی صفحه مستغرق در بستر رسوبی کانال مستقیم استفاده شد و ترکیب بهینه سه پارامتر چهارسطحی با استفاده از ۱۶ آزمایش پیشنهاد شده به روش تاگوچی به جای ۶۴ آزمایش تعیین شد. در این مطالعات مقایسه‌ای بین نتایج تاگوچی با فاکتوریل کامل صورت نگرفت [16]. روش تاگوچی برای تعیین موقعیت بهینه سازه محافظ آبستنگی در

پژوهشگران مجبور به نادیده گرفتن برخی از پارامترها یا صرف هزینه‌های بسیار زیاد می‌شوند. در بسیاری از مطالعات هیدرولیکی این مشکلات وجود دارد. یعنی وقتی متغیرهای زیادی که سطوح متعددی دارند در بررسی یک پدیده مؤثر باشد، بررسی فاکتوریل کامل ترکیبات از راه میدانی، آزمایشگاهی، عددی و یا تحلیلی بسیار وقت‌گیر و پرهزینه می‌باشد. روش طراحی مطالعات تاگوچی به جای استفاده از ترکیبات فاکتوریلی کامل از آرایه‌های متعامد استفاده می‌کند. آرایه متعامد یک ماتریس فاکتوریل جزئی است که در آن کلیه متغیرها به صورت همزمان مورد بررسی قرار گرفته و هیچ تغییری دارای وزن کمتر یا بیشتر از سایر متغیرها نیست، از طرفی بررسی اثرات متقابل متغیرها نیز امکان‌پذیر است. یعنی با استفاده از روش طراحی مطالعات تاگوچی، تعداد مطالعات نسبت به انجام تمامی مطالعات فاکتوریلی کاهش می‌یابد. از مزایای روش طراحی آزمایشات تاگوچی می‌توان به کاهش تعداد آزمایش‌ها و هزینه‌ها، امکان بررسی متغیرهای کیفی یا کمی با سطوح مختلف، تعیین سهم متغیرها، امکان تخمین نتایج در شرایط بهینه، امکان تخمین نتایج در سطوح دلخواه، تعیین سهم اثرات متقابل در نظر گرفته شده برای متغیرها و امکان بدست آوردن همزمان شرایط بهینه برای چندین تابع پاسخ اشاره نمود، اما عدم بررسی کلیه اثرات متقابل در بعضی از مواقع می‌تواند از معایب این روش باشد. روش تاگوچی به صورت گسترده در مهندسی صنایع، مهندسی مواد، مهندسی مکانیک، محیط زیست و اخیراً در مهندسی عمران استفاده می‌شود. به عنوان نمونه به منظور تعیین درصد بهینه بتونیت، دوده سیلیس و نسبت آب به سیمان در بهبود خاصیت شیره-دهی بتن [1]؛ برای بهینه‌سازی ویژگی‌های مخلوط خاکستر بادی با تغییر نسبت آب، ماسه درشت، خرده سنگ و خاکستر [2]؛ در تعیین ظرفیت باربری شمعه‌ها با تغییر پارامترهای خاک دربرگیرنده شمع [3]؛ در تعیین کارایی بلوط به عنوان منعقدکننده در تصفیه آب و فاضلاب [4]؛ در بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر در حذف سرب از محلول‌های آبی [5]؛ برای بهینه‌سازی جریان عبوری و پارامترهای هندسی بافلهای V شکل در یک کانال مستطیلی با تغییر عدد رینولدز، نسبت بازشدگی،

به بررسی تأثیر پارامترهای طول و موقعیت آبشکن بر هیدرودینامیک جریان حول آبشکن به کار رفته است. بدین منظور الگوی جریان حول یک آبشکن در بستر صلب یک کانال قوسی ۹۰ درجه با تغییر پارامترهای طول و موقعیت آبشکن شبیه‌سازی شده است. علاقمندان برای مطالعه جزئیات بیشتر در خصوص شبیه‌سازی عددی الگوی جریان حول آبشکن در قوس ۹۰ درجه به مرجع [20] مراجعه نمایند. در جدول (۱) ویژگی‌های هندسی و هیدرولیکی مطالعات نشان داده شده است که در آن‌ها تغییرات عدد فرود در کانال اصلی با عمق جریان ثابت و دبی متغیر صورت گرفته است. در شکل (۱) طرح شماتیک کانال قوسی و آبشکن نشان داده شده است.

شکل ۰.۱ هندسه مدلسازی شده آبشکن در خم ۹۰ درجه [20]

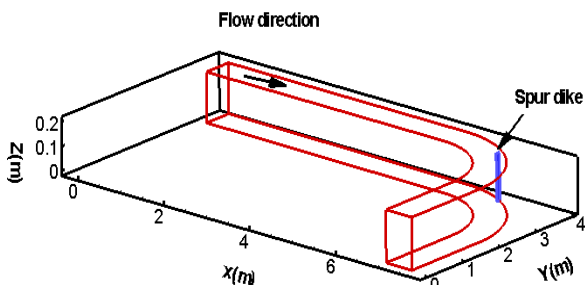


Fig. 1 geometric model of spur dike in 90 degree bend [20]

میدان جریان در اطراف آبشکن تیغه‌ای عمود بر ساحل قوس ۹۰ درجه به چهار ناحیه اصلی تقسیم می‌شود [21]: (۱) 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. (۲) ناحیه جریان برگشتی: فضایی در پشت آبشکن که در اثر وجود آبشکن و انسداد مسیر جریان اصلی در پشت آبشکن بوجود آمده است. (۳) لایه برشی: مرز بین ناحیه جریان اصلی و جریان برگشتی است. (۴) 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.

مقابل جت ریزشی مورد استفاده قرار گرفت و از نتایج آزمایشگاهی [17] و [18] استفاده شد که در آن آزمایشات متعددی با تغییر عامل‌های مؤثر بر پدیده آبشستگی جت‌های ریزشی انجام شد. نتایج نشان داد روش تاگوچی، به جای ۹۰۰ آزمایش، با استفاده از ۲۵ آزمایش ترکیب بهینه متغیرهای مؤثر بر پدیده را پیش‌بینی نموده است. همچنین به لحاظ آماری، تاگوچی درصد مشارکت متغیرهای مختلف بر توابع هدف را با دقت بسیار بالا و نزدیک به نتایج آزمایشات فاکتوریل کامل محاسبه نموده است [19].

بر اساس بررسی‌های صورت گرفته در زمینه مهندسی هیدرولیک، پژوهش اشاره شده اخیر، تنها پژوهش صورت گرفته با روش تاگوچی است که نتایج آن با طرح فاکتوریل کامل مقایسه شده است و در یک پدیده هیدرولیکی خاص یعنی جت‌های ریزشی بوده است. در پژوهش حاضر مطالعاتی به منظور بررسی تأثیر پارامترهای طول و موقعیت آبشکن در قوس ۹۰ درجه، در اعداد فرود مختلف، بر ابعاد ناحیه جدا شده در پایین دست آبشکن و مقادیر تنش برشی در پایین دست و مقابل آبشکن مطالعاتی انجام شده و سطوح بهینه این پارامترها که از مطالعات طراحی شده با روش تاگوچی بدست آمده با نتایج بدست آمده از مطالعات طراحی شده با روش فاکتوریل کامل مقایسه شده است. هدف از این کار بررسی تأثیر روش تاگوچی در کم نمودن تعداد مطالعات و در عین حال دقت نتایج آن نسبت به نتایج مربوط به انجام مطالعات طراحی شده با روش فاکتوریل کامل است. نتایج دو روش طراحی مطالعات مذکور از جنبه‌های مقدار بهینه هر متغیر، ترکیب بهینه متغیرها، صرفه جویی مالی و زمانی ناشی از کاربرد روش تاگوچی و تعداد متغیرهای قابل بررسی مقایسه شده است. برای بررسی الگوی جریان حول آبشکن از نرم افزار SSIM و برای طراحی مطالعات در هر دو روش و تحلیل نتایج آنها از نرم افزار مینی‌تب استفاده شده است.

## ۲- مواد و روشها

اشاره شد که روش تاگوچی در طراحی مطالعات مربوط

مدنظر قرار گرفته و از نتایج شبیه سازی عددی استخراج شده است.

۱- بیشینه طول ناحیه جدانشدگی در ناحیه جریان برگشتی (Ls/Bm) به منظور محقق شدن احیای ساحل؛

۲- بیشینه عرض ناحیه جدانشدگی در ناحیه جریان برگشتی (Bs/Bm) به منظور محقق شدن احیای ساحل؛

۳- بیشینه تنش برشی ناحیه اصلی ( $\frac{\tau_s}{\rho v^2}$ ) برای عمیق نمودن کانال (v سرعت جریان و  $\rho$  چگالی سیال)؛

۴- کمینه تنش برشی در لبه آبشکن ( $\frac{\tau_e}{\rho v^2}$ ) به منظور حفظ پایداری سازه آبشکن.

در جدول (۳) مقادیر توابع هدف بی بعد شده در ۲۷ مدل مختلف نشان داده شده است. در جدول (۳) مشخصه مطالعه عددی ۳ رقمی است که به ترتیب از سمت چپ، عدد اول سطح عامل Fr، عدد دوم سطح عامل Te/Tc و عدد سوم سطح عامل Le/Bm در هر مطالعه می باشد.

مطابق جدول (۳)، در مطالعه شماره ۱۹ با مشخصه ۱۱۳ بیشترین طول ناحیه جدایی جریان، در مطالعه شماره ۲۴ با مشخصه ۲۳۳ بیشترین عرض ناحیه جدایی جریان، در مطالعه شماره ۲۷ با مشخصه ۳۳۳ بیشترین تنش برشی در کانال اصلی و در مطالعه شماره ۴ با مشخصه ۲۱۱ کمترین تنش برشی حول آبشکن بوجود آمده است.

### ۳- طراحی مطالعات با روش تاگوچی

توابع هدف در بخش پیش مشخص شد. مطابق جدول (۲) تعداد عامل های مؤثر ۳ است. در طراحی مطالعات به روش تاگوچی پس از تعیین تابع هدف و عوامل مؤثر، باید مطالعات طراحی و اجرا شود؛ تحلیل نتایج صورت گیرد؛ ترکیب بهینه استخراج گردد و آزمایش تأیید انجام شود [22]. برای طراحی مطالعات و انتخاب آرایه متعامد مناسب، باید تعداد درجات آزادی عامل ها محاسبه شود. درجه آزادی برابر تعداد اطلاعاتی است که بصورت مجزا می توان از یک سری داده بدست آورد. به عنوان نمونه برای عامل چهار سطحی A،  $A_1$  را می توان با  $A_2, A_3$  و  $A_4$  مقایسه نمود ولی این قیاس را

جدول ۱ ویژگی های هندسی و هیدرولیکی آبشکن در خم ۹۰ درجه [20]

|             |  |
|-------------|--|
| 0.2         | Flow depth (m)                         |
| 15, 30, 45  | Q (lit/s)                              |
| 1.2 & 1.5   | Outer and inner radius (m)             |
| 0.6         | (m) :Bm                                |
| 2 & 5.5 (m) | Upstream and downstream channel length |
| 90          | Tc: Central angle of bend              |
| 30, 45, 60  | Te: The position of spur dike          |
| 5, 10, 15   | (cm) Spur dike length :Le              |

Table 1 Hydraulic and geometric properties of spur dike in 90 degree bend [20]

ناحیه جریان برگشتی نشان داده شده در شکل (۲) مستعد رسوبگذاری و احیای ساحل و ناحیه جریان اصلی مستعد آبشستگی و عمیق شدن آبراهه اصلی است. پارامترهای طول و موقعیت آبشکن در قوس و نیز عدد فرود جریان، بر ابعاد نواحی جریان نشان داده شده در شکل (۲) و عملکرد هیدرولیکی آبشکن تأثیر گذارند. مطابق جدول (۲) سه پارامتر و هریک در سه سطح تغییر مورد بررسی قرار گرفته است. بنابراین ۲۷ مدل عددی از ترکیب پارامترهای مذکور با استفاده از نرم افزار SSIIM شبیه سازی شده است.

شکل ۲. قسمت های مختلف میدان جریان حول آبشکن در قوس [20]

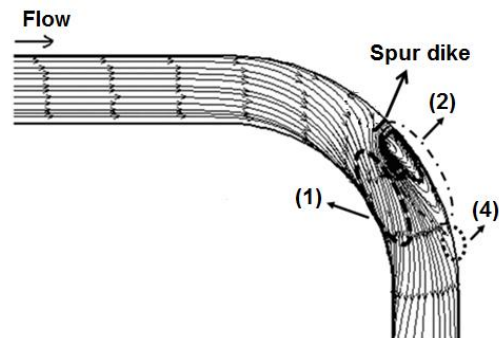


Fig. 2. parts of flow field around spur dike in bend [20]

جدول ۲ متغیرها و دامنه تغییرات

| Range            | Variables |
|------------------|-----------|
| 0.09, 0.18, 0.28 | Fr        |
| 0.08, 0.17, 0.25 | Le/Bm     |
| 0.34, 0.5, 0.67  | Te/Tc     |

Table 2. Range of variables

برای تعیین اثر پارامترهای فوق بر الگوی جریان حول آبشکن و تعیین مقدار بهینه آنها چهار تابع هدف به شرح ذیل

ستون یعنی ۳ درجه آزادی است که برای ۳ عامل دو سطحی مناسب است و در هر ستون دو بار سطح ۱ و دو بار سطح ۲ هر عامل ظاهر می‌شود. جدول (۴) نشان می‌دهد برای یک عامل دو سطحی و ۷ عامل سه سطحی می‌توان از آرایه  $L_{18}$  استفاده نمود که در آن ۱۸ ترکیب مختلف از سطوح عوامل درگیر مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای سایر آرایه‌ها می‌توان به کتاب‌های مرجع [22] یا راهنمای نرم‌افزار مینی‌تب [23] مراجعه نمود. در پژوهش حاضر هر عامل ۳ سطحی ۲ درجه آزادی، یعنی متغیرها  $3 \times 2 = 6$  درجه آزادی دارند. همچنین میانگین کل دارای ۱ درجه آزادی؛ بنابراین ۷ درجه آزادی در مسئله وجود دارد. لذا به آرایه‌ای با حداقل ۷ درجه آزادی نیاز است. آرایه  $L_4$  می‌تواند انتخاب شود.

نمی‌توان با خود  $A_1$  انجام داد. بنابراین سه حالت قیاس در یک عامل با چهار سطح تغییر وجود دارد. از طرفی تاگوجی برای طراحی مطالعات از آرایه‌های متعامد ( $L_n$ : L) نماد آرایه متعامد و  $n$  تعداد مطالعات یا آزمایشات) استفاده می‌نماید. در جدول (۴) برخی از آرایه‌های متعامد متداول برای تعداد عوامل و سطوح آن‌ها نشان داده شده است. هر آرایه  $L_n$  دارای  $n-1$  ستون است. هر ستون دارای ۱ درجه آزادی است، لذا تعداد درجات آزادی عوامل مؤثر بر یک پدیده تعداد ستونها یا همان آرایه را تعیین می‌کند. در آرایه متعامد وزن هیچ عاملی بیشتر یا کمتر از سایر عامل‌ها نیست و هریک از سطوح عامل‌ها به تعداد یکسان در یک ستون ظاهر می‌شود. به عنوان نمونه آرایه متعامد  $L_4$  آرایه‌ای است که شامل ۳

جدول ۳ مقادیر توابع هدف در ۲۷ مطالعه

| $\frac{\tau_e}{\rho v^2} \times 10^{-3}$ | $\frac{\tau_s}{\rho v^2} \times 10^{-3}$ | $L_s/B_m$ | $B_s/B_m$ | Fr   | $\theta_{ce}/\theta_c$ | Le/Bm | Study characteristics | Study No. |
|--|--|-----------|-----------|------|------------------------|-------|-----------------------|-----------|
| 1.66                                     | 1.9                                      | 1.245     | 0.207     | 0.09 | 0.34                   | 0.08  | 111                   | 1         |
| 1.79                                     | 1.98                                     | 1.24      | 0.228     | 0.09 | 0.5                    | 0.08  | 121                   | 2         |
| 1.79                                     | 2.03                                     | 1.275     | 0.237     | 0.09 | 0.67                   | 0.08  | 131                   | 3         |
| 1.6                                      | 1.76                                     | 1.281     | 0.204     | 0.18 | 0.34                   | 0.08  | 211                   | 4         |
| 1.76                                     | 1.92                                     | 1.273     | 0.225     | 0.18 | 0.5                    | 0.08  | 221                   | 5         |
| 1.92                                     | 1.92                                     | 1.3       | 0.235     | 0.18 | 0.67                   | 0.08  | 231                   | 6         |
| 1.71                                     | 1.85                                     | 1.345     | 0.203     | 0.27 | 0.34                   | 0.08  | 311                   | 7         |
| 1.85                                     | 1.99                                     | 1.333     | 0.223     | 0.27 | 0.5                    | 0.08  | 321                   | 8         |
| 1.99                                     | 1.99                                     | 1.336     | 0.234     | 0.27 | 0.67                   | 0.08  | 331                   | 9         |
| 3.2                                      | 2.88                                     | 2.389     | 0.314     | 0.09 | 0.34                   | 0.17  | 112                   | 10        |
| 3.2                                      | 2.88                                     | 2.233     | 0.34      | 0.09 | 0.5                    | 0.17  | 122                   | 11        |
| 3.52                                     | 2.88                                     | 1.938     | 0.353     | 0.09 | 0.67                   | 0.17  | 132                   | 12        |
| 3.2                                      | 2.88                                     | 2.386     | 0.315     | 0.18 | 0.34                   | 0.17  | 212                   | 13        |
| 3.52                                     | 2.88                                     | 2.255     | 0.34      | 0.18 | 0.5                    | 0.17  | 222                   | 14        |
| 3.52                                     | 2.88                                     | 2.003     | 0.335     | 0.18 | 0.67                   | 0.17  | 232                   | 15        |
| 3.91                                     | 2.87                                     | 2.277     | 0.3       | 0.27 | 0.34                   | 0.17  | 312                   | 16        |
| 4.02                                     | 2.84                                     | 2.193     | 0.325     | 0.27 | 0.5                    | 0.17  | 322                   | 17        |
| 4.2                                      | 3.04                                     | 1.918     | 0.388     | 0.27 | 0.67                   | 0.17  | 332                   | 18        |
| 4.99                                     | 4.29                                     | 3.29      | 0.408     | 0.09 | 0.34                   | 0.25  | 113                   | 19        |
| 5.1                                      | 4.5                                      | 2.9       | 0.423     | 0.09 | 0.5                    | 0.25  | 123                   | 20        |
| 5.24                                     | 4.49                                     | 2.888     | 0.442     | 0.09 | 0.67                   | 0.25  | 133                   | 21        |
| 5.33                                     | 4.38                                     | 3.226     | 0.427     | 0.18 | 0.34                   | 0.25  | 213                   | 22        |
| 5.46                                     | 4.58                                     | 2.876     | 0.442     | 0.18 | 0.5                    | 0.25  | 223                   | 23        |
| 5.6                                      | 4.58                                     | 2.843     | 0.452     | 0.18 | 0.67                   | 0.25  | 233                   | 24        |
| 6.04                                     | 4.58                                     | 3.238     | 0.417     | 0.27 | 0.34                   | 0.25  | 313                   | 25        |
| 6.13                                     | 4.69                                     | 2.9       | 0.435     | 0.27 | 0.5                    | 0.25  | 323                   | 26        |
| 6.27                                     | 4.74                                     | 3.887     | 0.45      | 0.27 | 0.67                   | 0.25  | 333                   | 27        |

Table 3. Response table for 27 studies

به همین ترتیب می توان برای سایر پارامترها اثرات عوامل را تعیین نمود. نمودار اثرات عوامل فوق بر چهار تابع هدف در شکل های (۳) تا (۶) نشان داده شده است. تا این مرحله بر اساس نتایج آزمایشات طراحی شده با روش تاگوچی با استفاده از ۹ مطالعه، سطح بهینه عوامل مؤثر بر توابع هدف به صورت ذیل تعیین شده است:

- اگر  $Te/Tc=0/67$  و  $Le/Bm=0/25$  بیشترین مقدار برای عرض ناحیه جدایی جریان رخ داده است؛
- اگر  $Te/Tc=0/34$  و  $Le/Bm=0/25$  بیشترین مقدار برای طول ناحیه جدایی جریان رخ داده است؛
- اگر  $Te/Tc=0/34$  و  $Le/Bm=0/08$  کمترین مقدار برای تنش برشی حول آبشکن رخ داده است؛
- اگر  $Te/Tc=0/67$  و  $Le/Bm=0/25$  بیشترین مقدار برای تنش برشی در کانال اصلی رخ داده است؛
- عدد فرود اثر بسیار کمی بر توابع هدف دارد.

شکل ۳. نمودار تأثیر عاملها بر بیشینه عرض ناحیه جدایی جریان

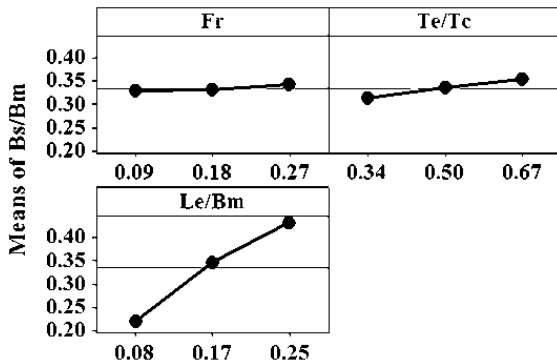


Fig. 3. Influence of factors on Bs/Bm

شکل ۴. نمودار تأثیر عاملها بر بیشینه طول ناحیه جدایی جریان

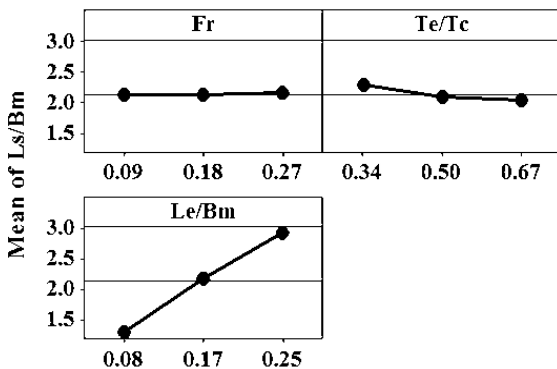


Fig. 4. Influence of factors on Ls/Bm

جدول ۴. آرایه های متعامد متداول [22]

| levels | No. of factors | Array    |
|--------|----------------|----------|
| 2      | 7              | $L_8$    |
| 2      | 15             | $L_{16}$ |
| 2 & 3  | 1 & 7          | $L_{18}$ |
| 3      | 4              | $L_9$    |
| 4      | 5              | $L_{16}$ |

Table 4. The popular orthogonal array [22]

در جدول (۵) ترکیبات سطوح عاملها در آرایه  $L_9$  و مطالعه متناظر آن در فاکتوریل کامل نشان داده شده است. با توجه به جدول (۵)، در هر مطالعه، مقادیر توابع هدف از مطالعه متناظر جدول (۳) استخراج خواهد شد.

جدول ۵. ترکیب سطوح عاملها در آرایه  $L_9$

| Corresponding study in Table 3 | Fr | Te/Tc | Le/Bm | Study No. |
|--------------------------------|----|-------|-------|-----------|
| 1                              | 1  | 1     | 1     | 1         |
| 11                             | 1  | 2     | 2     | 2         |
| 21                             | 1  | 3     | 3     | 3         |
| 13                             | 2  | 1     | 2     | 4         |
| 23                             | 2  | 2     | 3     | 5         |
| 6                              | 2  | 3     | 1     | 6         |
| 25                             | 3  | 1     | 3     | 7         |
| 8                              | 3  | 2     | 1     | 8         |
| 18                             | 3  | 3     | 2     | 9         |

Table 5. Combination of levels in  $L_9$  array

ورودی نرم افزار مینی تب شامل کلیه عوامل و سطوح تغییر آنها و نیز مقادیر توابع هدف متناظر با مطالعات جدول (۵) است. برای مشاهده میزان تأثیر سطوح هر عامل بر تابع هدف، از نمودار اثرات عوامل مستخرج از مینی تب استفاده می شود. در آرایه  $L_9$  هر سطح عامل ۳ سطحی، در سه مطالعه از نه مطالعه ظاهر می شود. به منظور تعیین تأثیر تغییر سطوح هر یک از عوامل بر تابع هدف، باید از یک دسته سه تایی از مطالعاتی که سطح مورد نظر پارامتر مفروض در آنها ظاهر شده میانگین گیری شود. برای مثال سطح "۱" پارامتر  $Le/Bm$  در مطالعات ۱، ۶ و ۸ جدول (۵) وجود دارد، لذا تأثیر  $(Le/Bm)_1$  بر تابع هدف  $Bs/Bm$  عبارتست از:

$$Bs / Bm_{(Le / Bm)_1} = \frac{(0 / 207 + 0 / 235 + 0 / 223)}{3} = 0 / 221$$

شکل ۷. مقایسه نتایج مرتب شده عرض ناحیه جدایی جریان

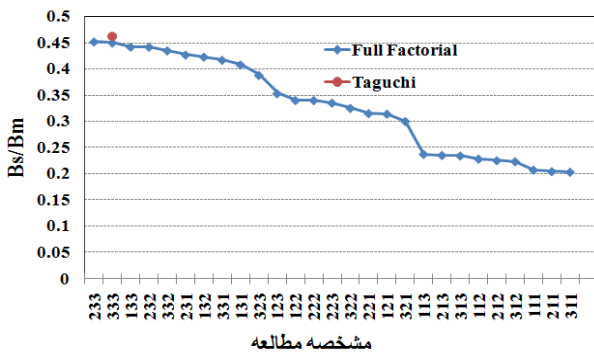


Fig. 7. Comparison of sorted results of Bs/Bm

شکل ۵. نمودار تأثیر عواملها بر کمینه تنش برشی حول آبشکن

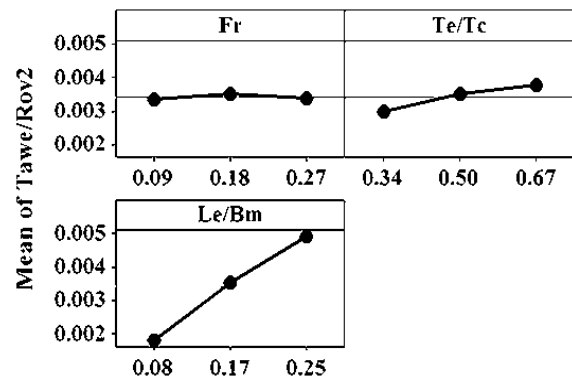


Fig. 5. Influence of factors on Tawe/Rov2

شکل ۸. مقایسه نتایج مرتب شده طول ناحیه جدایی جریان

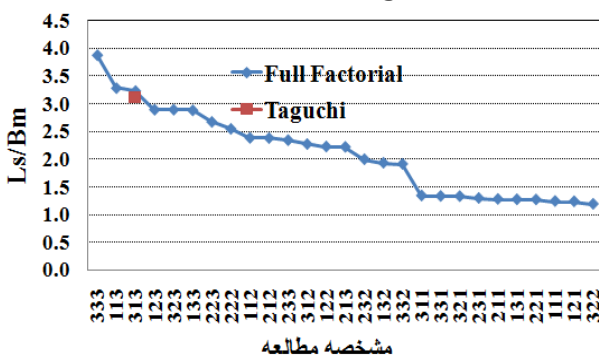


Fig. 8. Comparison of sorted results of Ls/Bm

شکل ۶. نمودار تأثیر عواملها بر بیشینه تنش برشی در کانال اصلی

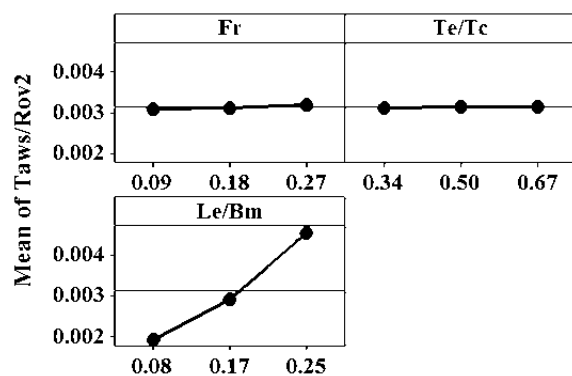


Fig. 6. Influence of factors on Taws/Rov2

مطابق شکل (۸) پیش‌بینی روش تاگوچی در بیشترین طول ناحیه جدایی ترکیب ۳۱۳ در مقابل فاکتوریل کامل است. لذا سطح بهینه موقعیت آبشکن متفاوت است، اما مطابق شکل (۴)، اثر تغییر موقعیت بر طول ناحیه جدایش کم است. مطابق شکل (۹) پیش‌بینی هر دو روش در بیشینه تنش برشی ناحیه جریان اصلی ترکیب ۳۳۳ است.

## ۴- مقایسه روش‌های تاگوچی و فاکتوریل کامل

در این مرحله روش تاگوچی با حالت فاکتوریل کامل از جنبه‌های مختلف مقایسه شده است.

### ۴-۱ پیش‌بینی بهترین ترکیب عوامل

برای مقایسه بهترین ترکیب عوامل، نتایج ۲۷ مطالعه جدول (۳) از بیشترین به کمترین مقدار برای هر یک از توابع هدف مرتب شده و نتیجه بهترین ترکیب روش تاگوچی نیز روی هر نمودار ارائه شده است. در شکل‌های (۷) تا (۱۰) این نمودارها نشان داده شده است.

مطابق شکل (۷) پیش‌بینی تاگوچی در بیشترین عرض ناحیه جدایی ترکیب ۲۳۳ و روش فاکتوریل کامل ۳۳۳ است. لذا سطح بهینه عدد فرود متفاوت است، اما مطابق شکل (۳)، تغییر عدد فرود تأثیر محسوسی بر نتایج ندارد.

شکل ۹. مقایسه نتایج مرتب شده تنش برشی در کانال اصلی

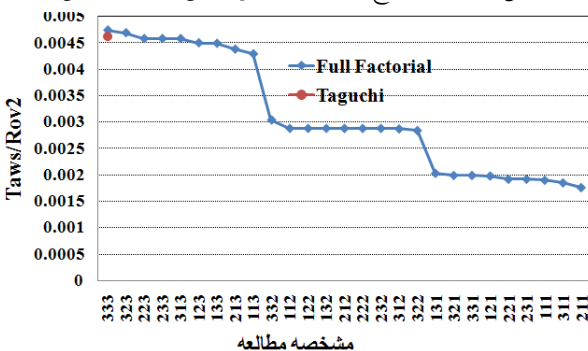


Fig. 9. Comparison of sorted results of Taws/Rov2

نتیجه با نتیجه مطالعات [20] کاملاً هماهنگ است. در مورد موقعیت آبشکن نیز که دارای اثر بیشتری از عدد فرود است، در هر دو روش تاگوچی و فاکتوریل کامل به درستی مشارکت آن در رده دوم پیش‌بینی شده است. آنچه که اهمیت زیادی دارد آن است که میزان مشارکت و درصد مشارکت دو عامل عدد فرود و موقعیت آبشکن دارای اثرات بسیار کم و در رتبه بعد از طول آبشکن هستند و نسبت به اثر طول آبشکن اثرات آن‌ها قابل چشم‌پوشی است که روش تاگوچی نیز مثل روش فاکتوریل کامل آن را پیش‌بینی نموده است. لذا برخی از تفاوت‌هایی که مشاهده شد تأثیری در نتایج نهایی ندارد.

#### ۳-۴ زمان اجرای مطالعات

همانطوریکه اشاره شد در مطالعات فاکتوریل کامل، ۲۷ مطالعه عددی انجام شده است تا بهترین ترکیب عوامل درگیر الگوی جریان پیرامون آبشکن بدست آید. با توجه به اینکه روش تاگوچی با ۹ مطالعه، نتایج قابل قبولی ارائه نموده است، لذا اگر از ابتدا مطالعات با روش تاگوچی طراحی و سپس اجرا می‌شد تعداد مطالعات در این پدیده خاص یک سوم و زمان اجرای مطالعات به یک سوم کاهش می‌یافت، لذا روش تاگوچی منجر به کاهش حدود ۶۶ درصدی در زمان مطالعات و به تبع آن در زمان تحلیل نتایج و در نهایت صرفه-جویی اقتصادی این مطالعات شده است.

#### ۴-۴ تعداد و سطوح عوامل قابل بررسی

در آرایه I<sub>m</sub> می‌توان اثر دو تا چهار عامل سه سطحی را بر تابع هدف مشخص نمود. در بررسی تأثیر تغییر پارامترها بر الگوی جریان حول آبشکن، فقط عوامل موقعیت و طول آبشکن در اعداد فرود مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. در صورتی که می‌توان تأثیر یک عامل دیگر مثلاً زاویه آبشکن نسبت به دیواره کانال را نیز ارزیابی نمود بدون آنکه در آرایه انتخابی یا تعداد مطالعات طراحی شده با روش تاگوچی تغییری ایجاد شود، یعنی به راحتی و با استفاده از ۹ مطالعه طراحی شده با روش تاگوچی می‌توان اثر چهار عامل سه سطحی را بر تابع هدف بررسی نمود. اگر قرار بود این چهار

شکل ۱۰. مقایسه نتایج مرتب شده تنش برشی حول آبشکن

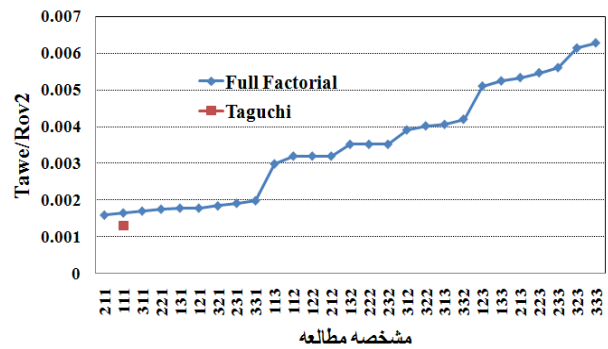


Fig. 9. Comparison of sorted results of Tawe/Rov2

مطابق شکل (۱۰) روش تاگوچی ترکیب ۱۱۱ را به جای ترکیب ۲۱۱ برای کمینه تنش برشی حول آبشکن پیش‌بینی نموده است. یعنی سطح بهینه عدد فرود متفاوت است، اما مطابق شکل (۶)، تغییر عدد فرود اثر بسیار کمی بر تغییرات این تابع هدف دارد. بر اساس مطالعات [20] با تغییر عدد فرود، توابع هدف عرض ناحیه جداسدگی و تنش برشی حول آبشکن تغییر محسوسی ندارند، همچنین تغییر موقعیت آبشکن تأثیر بسیار کمی بر تغییرات طول ناحیه جداسدگی دارد، لذا نتیجه تاگوچی نیز قابل اتکاست.

#### ۲-۴ تحلیل واریانس

تحلیل واریانس میزان مشارکت هریک از عوامل مؤثر در پدیده را بر تابع هدف مشخص می‌نماید. در جدول (۶) نتیجه تحلیل واریانس روش تاگوچی و فاکتوریل کامل بر تابع هدف عرض ناحیه جداسدگی باهم مقایسه شده است. برای سایر توابع نیز به همین صورت است و به دلیل رعایت اختصار از ارائه آن خودداری شده است. درصد مشارکت هر عامل از تقسیم مجموع مربعات آن عامل بر مجموع مربعات کل بدست آمده است. برای جزئیات محاسبات تحلیل واریانس علاقمندان می‌توانند به نرم افزار مینی‌تپ مراجعه نمایند.

مطابق جدول (۶)، عامل طول آبشکن بیشترین تأثیر را بر تابع هدف دارد و درصد مشارکت آن در کلیه توابع هدف در هر دو روش تاگوچی و فاکتوریل کامل رتبه یک را دارد. دو عامل دیگر یعنی عدد فرود و موقعیت آبشکن دارای اثرات بسیار کم بر تغییرات تابع هدف هستند و حتی عدد فرود دارای درصد مشارکت صفر یا نزدیک به صفر است. این



عامل و هریک در سه سطح تغییر در مطالعات فاکتوریل کامل وارد می‌شد باید  $3^4=81$  مطالعه انجام می‌شد.

## ۵- نتیجه گیری

در پژوهش حاضر به بررسی تأثیر کاربرد روش تاگوچی در طراحی مطالعات مربوط به الگوی جریان حول آبشکن با تغییر پارامترهای مؤثر پرداخته شد. نتایج مطالعات طراحی شده با روش تاگوچی با نتایج مربوط به طراحی مطالعات با روش فاکتوریل کامل از جنبه‌های تعداد مطالعات، تعیین سطح بهینه هریک از پارامترها و ترکیب آن‌ها و همچنین زمان انجام مطالعات مقایسه شد. نتایج بدست آمده از پژوهش حاضر به اختصار عبارتند از:

- روش تاگوچی، به جای ۲۷ مطالعه، با استفاده از ۹ مطالعه، با دقت خوب و نزدیک به نتایج طرح فاکتوریل کامل،

ترکیب بهینه عامل‌های مؤثر بر پدیده را پیش بینی نموده است.

- تحلیل نتایج ۹ مطالعه که با روش تاگوچی طراحی شده‌اند نشان داد عامل طول آبشکن بیشترین تأثیر را بر تغییرات الگوی جریان حول آبشکن در قوس دارد و به ترتیب عوامل موقعیت و عدد فرود در رتبه‌های بعدی قرار دارند. این نتیجه با تحلیل نتایج مطالعات طراحی شده با روش فاکتوریل کامل منطبق است.
- همانطوری که در جدول ۴ نشان داده شده است، با آرایه  $L_9$  اثر ۴ عامل سه سطحی قابل بررسی است. در تحقیق حاضر سه عامل سه سطحی در آرایه  $L_9$  استفاده شده است، لذا با ۹ مطالعه طراحی شده با روش تاگوچی بررسی اثر یک عامل دیگر مثل زاویه آبشکن نیز امکان پذیر است بدون آنکه تعداد مطالعات تغییر کند.

جدول ۶ مقایسه نتایج تحلیل واریانس عاملها بر تابع هدف عرض ناحیه جداشدگی در روش تاگوچی و فاکتوریل کامل

| Rank | Percentage of contribution for full factorial method | Rank | Percentage of contribution for Taguchi method | Sum of square for full factorial method | Sum of square for Taguchi method | Factor          |
|------|--|------|---|---|----------------------------------|-----------------|
| 3    | ٪0.02  | 3    | ٪ 0.43  | 0.00004                                 | 0.000314                         | (Fr)            |
| 2    | ٪2.9   | 2    | ٪3.6  | 0.0061                                  | 0.0026                           | (Te/Tc)         |
| 1    | ٪95.7  | 1    | ٪94.84  | 0.2                                     | 0.068                            | (Le/Bm)         |
|      | ٪0.3   |      |   | 0.00064                                 |                                  | Fr* Te/Tc       |
|      | ٪0.17  |      |   | 0.00036                                 |                                  | Le/Bm* Te/Tc    |
|      | ٪0.22  |      |   | 0.00047                                 |                                  | Fr*Le/Bm        |
|      | ٪0.47  |      |   | 0.001                                   |                                  | Fr*Le/Bm* Te/Tc |
|      | 0  |      | ٪0.83   | 0                                       | 0.0006                           | errors          |
|      | ٪100   |      | ٪100  | 0.209                                   | 0.0717                           | Sum             |

Table 6. Comparison of Analysis of variance Taguchi and full factorial methods on Bs/Bm

- [12]Eskandari-Naddaf, H; Azimi-Pour, M. 2016. Performance evaluation of dry-pressed concrete curbs with variable cement grades by using Taguchi Method. *Ain Shams Engineering Journal*, In press.
- [13] Zanjirchi, S., Amani, M., Azizi, F. 2017. Presentation of a model for predicting the success rate of development projects by integrating Taguchi and gray taxonomy design techniques. *Amirkabir Civil Engineering and Environment Journal*, 49(1), 171-180. (In Persian).
- [14] Ejlali, A. 2006. Application of Taguchi method in predicting the properties of reinforced concrete construction made of Pumyshestan squadron and comparing the results with the results of the method of performing all experiments. M. Sc. of structure, *Sahand University of Technology*. (In Persian).
- [15]Gunay, B; Hinishlioglu, S. 2011. Traffic microsimulation scenario tests by the Taguchi method. *Proceedings of the ICE - Transport*, 164(1); 33–42.
- [16] Rostamabadi, M., Salehi Neyshabouri, A. Zarrati, A. R. 2013. Optimization of geometric parameters of the submerged vane in alluvial bed of straight channel using the Taguchi and GRA methods. *Modares Civil engineering Journal*, 13, 79-93. (In Persian).
- [17]Pagliara, S; Hager, W; and Minor, H. 2006. Hydraulics of plane plunge pool scour. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(5), 450-461.
- [18]Pagliara, S; Palermo, M. 2008. Plane plunge pool scour with protection structures. *Journal of Hydro-Environment Research*, 2, 182-191.
- [19] Rostamabadi, M., Salehi Neyshabouri, A. Zarrati, A. R. 2013. Comparison of Taguchi method with full factorial method in determining the optimal position of scouring protection against falling jets. *Iranian Journal of water and Environmental Engineering*, 1(2), 35-46. (In Persian).
- [20] Rostamabadi, M., Naji Abhari, M. 2013. Application of GRA method to optimize the length and position of the spur dike in the 90 ° bend. *Hydraulic journal*, 8(4), 41-27. (In Persian).
- [21]Chen, Y; Ikeda, S. 1997. Horizontal separation flow in shallow open channel with spur dike. *Journal of Science and Hydraulic Engineering*, 15(2). 1997.
- [22]Roy, K. R. 1990. A primer on the Taguchi method. Society of manufacturing engineers, New York. NY.
- [23]Minitab Inc. 2006. Minitab 15, Help, Minitab Tutorials, Session five, Design an Experiment.

## References

## ۴- مراجع

- [1] Tan, O; Zaimoglu, A. S; Hinishlioglu, S; and Altun, S. 2005. Taguchi approach for optimization of the bleeding on cement-based grouts. *Tunneling and Underground Space Technology*; 20, 167-173.
- [2] Chaulia, P. K; and Das, R. 2008. Process parameter optimization for fly ash brick by Taguchi method. *Materials Research*, 11(2), 159-164.
- [3] Ghahramani, P. 2009. Estimation of bearing capacity of piles using numerical modeling of piling loading test. M.Sc. thesis for Soil and Foundation. Tarbiat Modares Uni. (In Persian).
- [4] Paidari, P., Taebi, A. Hasheminejad, H. 2010. Oak Performance as Coagulant in Water and Sewage Treatment. *Fourth Environmental Professional Conference*, Tehran Uni. (In Persian).
- [5] Takhtkoseh, A., Taebi, A., Afuni, M. 2011. Optimization of the effective parameters for the removal of Pb(II) from aqueous solutions by dolomite as a cheap absorbent. *Fourth National Congress on Civil Engineering*. Tehran Uni. (In Persian).
- [6]Chamoli, S. 2015. Taguchi approach for optimization of flow and geometrical parameters in a rectangular channel roughened with V down perforated baffles. *Case Studies in Thermal Engineering*, 5, 59–69.
- [7] Shahsavan, s., Sadeghi, M., Fadaee, A., Sedehi, M., Razavi, T. 2005. Optimization of purified phenol with persulfate in the presence of iron ion. *Journal of Water and Sewage*, 100, 69-75. (In Persian).
- [8] Hashemi, S., Norozi, A. 2005. Investigating the effects of temperature increase on the performance of structural light concrete containing various percentages of nano-silica. *Journal of Iran Concrete Research*, 8(1). 55-69. (In Persian).
- [9] Mirmohamad Sadeghi, M., Mokhtari, A., Sotodeh far, A., Hajian nia, A. 2016. Evaluation of effective factors on shear strength of sandy soils modified by biological method using Taguchi theory. *Modares Civil Engineering Journal*, 16(3), 191-202. (In Persian).
- [10] Mirmohamad Sadeghi, M., Mokhtari, A., Sotodeh far, A. 2016. Factors Affecting Bioremediation of Soil Using the Method of Injection of Bacteria in Sand Soils. *Journal of Soil and Water Sciences*, 77, 71-83. (In Persian).
- [11] Rahmani, H., Yazdani, M., Nikoodel, M. 2016. Application of Taguchi method for optimization of mixing design of semi-structural lightweight concrete made with Pumice straw. *Sharif Civil Engineering Journal*. 32(4), 101-108. (In Persian).

# Comparison of the Results of Studies Designed by Taguchi and Full Factorial Methods for Parametric Investigation of Flow Pattern around Spur Dike

Massumeh Rostamabadi <sup>1\*</sup>, Mandana Naji Abhari <sup>2</sup>

1. Assistant Professor, Civil engineering group, Buinzahra branch, Islamic Azad University, Buinzahra, Iran

2. Assistant Professor, Asrar Institute of Higher Education, Mashhad, Iran

\*Rostamabadi@buiniau.ac.ir

## Abstract

Full factorial investigation is necessary in the study of the hydraulic phenomena which are functions of different variables with different levels. It is logical to use the full factorial method when the number of variables and their levels are low. However, sometimes due to lack of time and shortage of financial restrictions, using the full factorial method is not possible. The Taguchi method, which is used for design of experiments, uses the fractional factorial instead of full factorial. This method not only decreases the number of studies but also guaranties the correlated comparison of all variables. The benefits of design of experiment by Taguchi method are as follows: to reduce the number of studies and costs, to investigate the qualitative or quantitative variables at different levels, to determine the contribution of variables, to estimate results in optimum conditions and at the desired levels and to obtain optimal conditions for several responses simultaneously. Taguchi methods are widely used in industrial engineering, materials engineering, mechanical engineering, environmental and recently used in civil engineering. Based on studies in the field of hydraulic engineering, researchers have had less attention to the Taguchi method for the design of experiments or studies. In this paper the Taguchi method is used for finding the optimized hydraulic parameters like the length and location of spur dike in different Froude Numbers in 90 degree bend.

Four responses are considered as follow: 1) and 2) The maximum length and width of separation zone in the area of backflow respectively ( $L_s/B_m$  and  $B_s/B_m$ ) in order to achieve the restoration of the beach, 3) The maximum shear stress in the area of mainstream and 4) The Minimum shear stress at the tip of the spur dike. In order to get the results, the parameters of length, location of spur dike in 90-degree bend, and the Froude Number are considered with three different levels. The SSIIM numerical model is applied to simulate the studies designed by Taguchi and full factorial methods. For both, Minitab software has been used to design the studies and analyses. Comparison between the results of studies designed by Taguchi method and full factorial method shows that Taguchi method, could predict the optimum parameters only with 9 studies whereas with full factorial method 27 studies were necessary. Also, using Taguchi method leads to more than 66% decrease in the total running time. For studies designed by Taguchi method, the optimum value of length of spur dike is the same as the one designed by full factorial method. Also, the length of spur dike is the most effective parameter on flow pattern around spur dike and the position of spur dike and Froude Number are next in rank, respectively. These results are the same in both methods used to design the studies. Using 9 studies designed by Taguchi method, the investigation of the effect of other parameters such as the angle of spur dike is possible without changing the number of studies, whereas 81 studies should be carried out by full factorial method, to investigate four parameters with three levels.

**Key words:** 90 degrees bend, Taguchi method, full factorial, cost and time saving