

تعیین مقدار بهینه ارتفاع و موقعیت بلوک‌های آرام کننده با استفاده از مطالعات طراحی شده با روش‌های تاگوچی و فاکتوریل کامل

معصومه رستم آبادی

استادیار گروه عمران، واحد بوئین زهرا، دانشگاه آزاد اسلامی، بوئین زهرا

Rostamabadi@buiniau.ac.ir

چکیده - اگر متغیرهای زیادی که سطوح متعددی دارند در بررسی یک پدیده هیدرولیکی مؤثر باشند، یافتن ترکیب بهینه از طریق بررسی فاکتوریل کامل ترکیبات بسیار وقت‌گیر و پرهزینه می‌باشد. در بسیاری از علوم دیگر به جای روش فاکتوریل کامل، از روش تاگوچی برای طراحی مطالعات استفاده می‌شود. روش تاگوچی از ترکیبات فاکتوریلی جزئی بهره می‌برد و ضمن کاهش تعداد آزمایش‌ها، مقایسه موزون تمام متغیرها را تضمین می‌کند. این روش در مطالعات هیدرولیکی کمتر مورد توجه بوده است. لذا در پژوهش حاضر به مقایسه نتایج مطالعات طراحی شده با روش‌های تاگوچی و فاکتوریل کامل در تأثیر پارامترهای ارتفاع و موقعیت بلوک‌های آرام کننده جریان در شرایط هیدرولیکی مختلف به منظور کنترل آبشستگی پایین‌دست حوضچه آرامش پرداخته شده است. از نتایج آزمایشگاهی (Fahmy Abdelhaleem (2013) استفاده شده است. هدف از این کار بررسی این مسئله است که آیا با استفاده از روش تاگوچی و کم نمودن تعداد آزمایش‌ها می‌توان نتایج نزدیک به نتایج مربوط به انجام تمام آزمایش‌های طراحی شده با روش فاکتوریل کامل را حاصل نمود. اگر پاسخ مثبت باشد، چه مقدار خطا در نتایج وارد خواهد شد، از طرفی مقدار بهینه بدست آمده برای هر متغیر تا چه حد قابل اتکاست. همچنین مقدار صرفه‌جویی مالی و زمانی ناشی از کاربرد روش تاگوچی در یک پدیده هیدرولیکی چقدر است. بنابراین ضمن تحلیل نتایج آزمایشگاهی، سطوح بهینه متغیرهایی که از طراحی مطالعات با روش تاگوچی بدست آمده با نتایج بدست آمده از روش فاکتوریل کامل از جنبه‌های مختلف مقایسه شده است. نتایج نشان داد روش تاگوچی به جای 80 آزمایش، با استفاده از 25 آزمایش، با دقت خوب و نزدیک به نتایج طرح فاکتوریل کامل، ترکیب بهینه پارامترهای مؤثر بر پدیده را پیش‌بینی نموده و منجر به صرفه‌جویی بیش از 70 درصد در زمان کل انجام آزمایش‌ها شده است. از طرفی مقدار عمق آبشستگی نسبی پایین‌دست با ترکیب بهینه پیش‌بینی شده با روش‌های تاگوچی و فاکتوریل کامل به ترتیب 0/119 و 0/122 بوده است.

کلیدواژگان: بلوک‌های آرام کننده، حوضچه آرامش، تاگوچی، فاکتوریل کامل.

1- مقدمه

بیشینه و یا رسیدن به یک مقدار مشخص باشد، حالت بهینه یعنی بهترین ترکیب ممکن از سطوح متغیرها تعیین می‌شود. اگر m متغیر و هر یک در L سطح ($L > 2$) مطرح باشد، تعداد کل ترکیبات ممکن (N) عبارتست از

در بسیاری از پدیده‌های هیدرولیکی تمام ترکیبات ممکن (فاکتوریل کامل) متغیرهای مؤثر بر پدیده بررسی می‌شود و از بین آنها با توجه به نوع تابع هدف که می‌تواند کمینه،

$N=L^m$ یعنی اگر متغیرهای زیادی که سطوح متعددی دارند، در بررسی یک پدیده مؤثر باشند، یافتن ترکیب بهینه از طریق بررسی فاکتوریل کامل ترکیبات از راه میدانی، آزمایشگاهی، عددی و یا تحلیلی بسیار وقت‌گیر و پرهزینه می‌باشد. روش تاگوچی که برای طراحی مطالعات به کار می‌رود، به جای استفاده از ترکیبات فاکتوریلی کامل، از ترکیبات فاکتوریلی جزئی بهره می‌برد که در آن برای طراحی ترکیبات سطوح متغیرها، از آرایه‌های متعامد استفاده می‌کند. آرایه متعامد یک ماتریس فاکتوریل جزئی است که مقایسه موزون تمام متغیرها یا اثرات متقابل آن‌ها را تضمین می‌کند. اگرچه به علت کم شدن تعداد آزمایش‌ها (نسبت به انجام تمامی آزمایشات) مقداری تقریب در این روش وارد می‌شود، اما با در نظر گرفتن کاهش تعداد آزمایش‌ها و صرفه‌جویی‌های اقتصادی و زمانی حاصله، این تقریب قابل قبول است.

روش تاگوچی به صورت گسترده در مهندسی صنایع، مواد، مکانیک، محیط زیست و اخیراً در مهندسی عمران استفاده می‌شود. به عنوان نمونه Tan et al. (2005) به منظور تعیین درصد بهینه بنتونیت، دوده سیلیس و نسبت آب به سیمان در بهبود خاصیت شیردهی بتن؛ Chaulia and Das (2008) برای بهینه‌سازی ویژگی‌های مخلوط خاکستر بادی با تغییر نسبت آب، ماسه درشت، خرده سنگ و خاکستر؛ قهرمانی منجقچی (1388) در تعیین ظرفیت باربری شمعها با تغییر پارامترهای خاک دربرگیرنده شمع؛ تخت کوسه (1390) در بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر در حذف سرب از محلول‌های آبی و میر محمد صادقی و همکاران (1395) در ارزیابی عوامل مؤثر بر مقاومت برشی خاک ماسه‌ای بهسازی شده از روش تاگوچی در طراحی آزمایش‌ها استفاده نمودند. 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. اجلالی (1385) از روش تاگوچی برای پیش‌بینی خواص بتن‌های سبک‌دانه ساخته شده از سنگدانه پومیس معدن اسکندان استفاده نمود که در آن، علاوه بر انجام آزمایشات در حالت فاکتوریل کامل (54 آزمایش)، طراحی آزمایش‌ها با روش تاگوچی (9)

آزمایش) نیز انجام شد و خطای روش تاگوچی در پیش-بینی مقاومت‌های 7، 28 و 91 روزه بتن حداکثر 13/9 درصد بدست آمد. (Gunay and Hınıslıoglu (2011) در تعیین زمان تأخیر ترافیک در شبکه راه‌ها، به مقایسه روش تاگوچی با طرح فاکتوریل کامل پرداخته و نتیجه گرفتند در روش تاگوچی راحت‌تر از طرح فاکتوریل کامل، اثر متقابل عوامل درگیر قابل تعیین است. رستم آبادی و همکاران (1392، الف) از روش طراحی مطالعات تاگوچی به منظور بهینه‌سازی شاخص‌های هندسی صفحه مستغرق در بستر رسوبی کانال مستقیم استفاده نمودند و ترکیب بهینه سه پارامتر چهارسطحی را با استفاده از 16 آزمایش پیشنهاد شده به روش تاگوچی، به جای 64 آزمایش تعیین نمودند. در مطالعات ایشان مقایسه‌ای بین نتایج تاگوچی با فاکتوریل کامل صورت نگرفت. رستم آبادی و همکاران (1392، ب) روش تاگوچی را برای تعیین موقعیت بهینه سازه محافظ آبشستگی در مقابل جت ریزشی مورد استفاده قرار دادند. نتایج نشان داد روش تاگوچی، به جای 900 آزمایش، با استفاده از 25 آزمایش، با دقت بسیار بالا و نزدیک به نتایج طرح فاکتوریل کامل، ترکیب بهینه متغیرهای مؤثر بر پدیده را پیش‌بینی نموده است. همچنین به لحاظ آماری، روش تاگوچی درصد مشارکت متغیرهای مختلف بر توابع هدف را با دقت بسیار بالا و نزدیک به نتایج آزمایشات فاکتوریل کامل نشان داده است.

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 انجام گرفته است. در پژوهش حاضر به مقایسه نتایج مطالعات طراحی شده با روش‌های تاگوچی و فاکتوریل کامل در تأثیر پارامترهای ارتفاع و موقعیت بلوک‌های آرام کننده جریان در شرایط مختلف جریان به منظور کنترل آبشستگی پایین‌دست حوضچه آرامش پرداخته شده است. هدف از این کار بررسی موارد ذیل است:

1. آیا با استفاده از روش تاگوچی و کم نمودن تعداد مطالعات، می‌توان نتایج نزدیک به نتایج مربوط به انجام

به عنوان حوضچه آرامش استفاده شده و پایین دست آن با بستر آبرفتی به ارتفاع 0/3 متر، با رسوب به قطر متوسط 0/688 mm پر شده است. یک ردیف بلوک آرام کننده جریان در فواصل مختلف نسبت به پنجه سرریز در قسمت صلب نصب شده است. در شکل 1 طرح شماتیک سرریز، هریک از موقعیت‌های یک ردیف بلوک روی بستر صلب و در انتها بستر آبرفتی پایین دست نشان داده شده است.

به منظور بررسی تأثیر ارتفاع بلوک‌ها (H_b) بر آبشستگی پایین دست حوضچه، چهار ارتفاع مختلف $0/334 D_0$ ، $0/667 D_0$ ، $1 D_0$ و $1/33 D_0$ که در آن D_0 قطر خارجی بلوک است، در نظر گرفته شد.

همچنین برای موقعیت بلوک‌ها (L_b) نسبت به پنجه سرریز، چهار موقعیت $0/4L_f$ ، $0/5L_f$ ، $0/6L_f$ و $0/8L_f$ که در آن L_f طول کف صلب است، مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش‌ها در سه دبی مختلف 20، 25 و 32 لیتر بر ثانیه به ازای اعماق مختلف جریان در پای سرریز که معادل پنج عدد فرود مختلف بود، انجام شد. در جدول 1 متغیرها و دامنه تغییرات آنها ارائه شده است. به عبارت دیگر از ترکیب فاکتوریل کامل متغیرهای فوق، 80 آزمایش مختلف برای بررسی کاهش آبشستگی پایین دست حوضچه آرامش توسط بلوک‌های آرام کننده با ارتفاع و موقعیت‌های مختلف و در شرایط هیدرولیکی متفاوت انجام شد و بیشینه عمق و طول آبشستگی پایین دست اندازه‌گیری شده است. لازم به ذکر است که ابتدا آزمایش‌هایی به منظور تعیین آبشستگی پایین دست حوضچه آرامش بدون حضور بلوک‌های آرام کننده صورت گرفت.

کلیه مطالعات طراحی شده با روش فاکتوریل کامل را بدست آورد؟

2. اگر پاسخ مثبت باشد، چه مقدار خطا در نتایج وارد خواهد شد؟

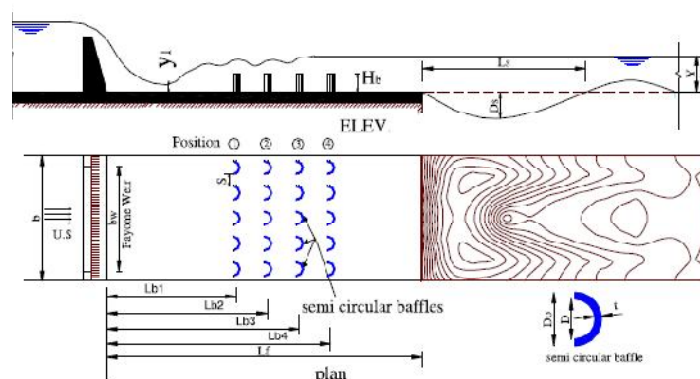
3. مقدار بهینه بدست آمده برای هر پارامتر تا چه حد قابل اتکاست؟

4. صرفه جویی مالی و زمانی ناشی از کاربرد روش تاگوجی در این مطالعه هیدرولیکی چقدر است؟

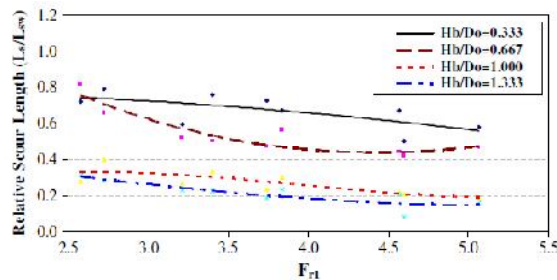
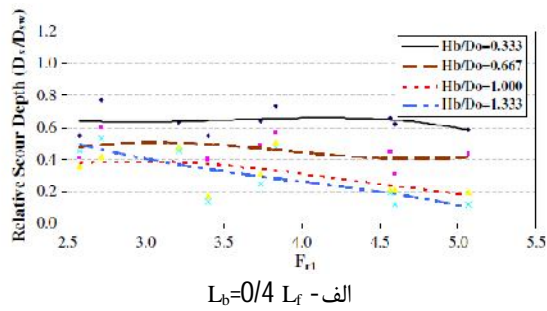
بدین منظور از نتایج آزمایشگاهی Fahmy Abdelhaleem (2013) استفاده شده است. که در آن آزمایش‌هایی با تغییر ارتفاع و موقعیت بلوک‌های آرام کننده در شرایط مختلف جریان به منظور کاهش آبشستگی پایین دست حوضچه آرامش انجام شده است. برای طراحی مطالعات به روش تاگوجی و تحلیل آنها و نیز طراحی مطالعات فاکتوریل کامل از نرم افزار Minitab استفاده می‌شود.

2- مواد و روش‌ها

Fahmy Abdelhaleem (2013) آزمایشاتی را با تغییر پارامترهای ارتفاع و موقعیت بلوک‌های آرام کننده جریان در شرایط مختلف جریان به منظور کنترل آبشستگی پایین دست حوضچه آرامش انجام داد. آزمایشات در یک کانال مستقیم به طول 20 متر، با عرض و ارتفاع 0/6 متر انجام شد. برای ایجاد جریان فوق بحرانی در ابتدای کانال از یک سرریز به ارتفاع 0/2 m و برای ایجاد پرش هیدرولیکی روی بستر صلب، از یک دریچه انتهایی استفاده شد. قسمتی از کانال پس از سرریز با بستر صلب



شکل 1 طرح شماتیک نما و پلان سرریز، هریک از موقعیت‌های یک ردیف بلوک و پارامترهای یک بلوک (Fahmy Abdelhaleem, 2013)



شکل 3 عمق و طول حفره آبستنگی با بلوک نسبت به حالت بدون بلوک (Fahmy Abdelhaleem, 2013)

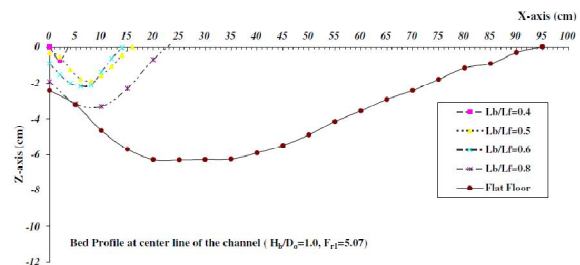
در این جدول مشخصه آزمایش عددی 3 رقمی است که به ترتیب از سمت چپ، عدد اول سطح پارامتر H_b/D_0 عدد دوم سطح پارامتر L_b/L_f و عدد سوم سطح پارامتر Fr در هر آزمایش می‌باشد. به عنوان نمونه مشخصه آزمایش 125، آزمایش شماره 10 با ترکیب $H_b/D_0=0/334$ ، $L_b/L_f=0/5$ و $Fr=5/07$ است.

مطابق جدول 2، در آزمایش شماره 65 با مشخصه آزمایش 415 که در آن $H_b/D_0=1/334$ ، $L_b/L_f=0/4$ و $Fr=5/07$ می‌باشد، کمترین عمق حفره آبستنگی رخ داده است. از طرفی آزمایش شماره 13 با مشخصه آزمایش 133 که در آن $H_b/D_0=0/334$ ، $L_b/L_f=0/6$ و $Fr=3/74$ می‌باشد، منجر به بیشترین عمق حفره آبستنگی شده است. همچنین در آزمایش شماره 42 با مشخصه 312 که در آن $H_b/D_0=1$ ، $L_b/L_f=0/4$ و $Fr=3/21$ و سپس آزمایش شماره 65 با مشخصه 415 که در آن $H_b/D_0=1/334$ ، $L_b/L_f=0/4$ و $Fr=5/07$ می‌باشد، کمترین طول حفره آبستنگی رخ داده است. آزمایش شماره 31 با مشخصه 231 که در آن $H_b/D_0=0/667$ ، $L_b/L_f=0/6$ و $Fr=2/58$ می‌باشد، نیز به بیشترین طول حفره آبستنگی انجامیده است.

جدول 1 متغیرها و دامنه تغییرات آنها در کاربرد بلوک‌های آرام کننده برای کاهش آبستنگی پایین دست حوضچه آرامش (Fahmy Abdelhaleem, 2013)

متغیر	تعداد سطح	دامنه تغییرات
H_b/D_0	4	0/334، 0/667، 1 و 1/334
L_b/L_f	4	0/4، 0/5، 0/6 و 0/8
Fr	5	2/58، 3/21، 3/74، 4/57 و 5/07

در شکل 2 شکل حفره ایجاد شده در پایین دست حوضچه آرامش در یکی از حالت‌های ارتفاع بلوک یعنی $H_b/D_0=1$ به ازای عدد فرود $Fr=5/07$ برای چهار موقعیت مختلف بلوک‌ها نشان داده شده است.



شکل 2 حفره ایجاد شده در پایین دست حوضچه آرامش برای $H_b/D_0=1$ و $Fr=5/07$ در چهار موقعیت مختلف بلوک‌ها (Fahmy Abdelhaleem, 2013)

در این شکل محور قائم عمق حفره آبستنگی و محور افقی طول آن را نشان می‌دهد. مطابق این شکل در حالت بدون بلوک، طول و عمق حفره آبستنگی بسیار بیشتر از حالت با بلوک است و هرچه فاصله بلوک‌ها از پنجه سرریز کمتر باشد، ابعاد حفره آبستنگی کوچکتر است. در کلیه 80 آزمایش انجام شده عمق (D_s) و طول (L_s) حفره آبستنگی اندازه‌گیری شده و نسبت به عمق حفره آبستنگی در حالت بدون بلوک‌ها (D_{sw}) و طول حفره آبستنگی در حالت بدون بلوک‌ها (L_{sw}) بی بعد شده است. به عنوان نمونه در شکل 3 عمق حفره آبستنگی در حالت $L_b=0/4L_f$ و نسبت به حالت بدون بلوک ارائه شده است.

با استفاده از نرم‌افزار getdata مقادیر عمق و طول حفره آبستنگی پایین دست حوضچه آرامش از روی شکل‌های ارائه شده در مرجع (Fahmy Abdelhaleem, 2013) در 80 آزمایش مذکور برداشت شده و در جدول 2 ارائه شده است.

0/568	0/637	5/07	0/8	0/667	245	40
0/323	0/359	2/58	0/4	1	311	41
0/025	0/481	3/21	0/4	1	312	42
0/196	0/314	3/74	0/4	1	313	43
0/146	0/211	4/57	0/4	1	314	44
0/177	0/192	5/07	0/4	1	315	45
0/279	0/384	2/58	0/5	1	321	46
0/267	0/46	3/21	0/5	1	322	47
0/227	0/407	3/74	0/5	1	323	48
0/221	0/413	4/57	0/5	1	324	49
0/180	0/314	5/07	0/5	1	325	50
0/289	0/443	2/58	0/6	1	331	51
0/327	0/553	3/21	0/6	1	332	52
0/245	0/51	3/74	0/6	1	333	53
0/294	0/465	4/57	0/6	1	334	54
0/18	0/356	5/07	0/6	1	335	55
0/423	0/461	2/58	0/8	1	341	56
0/378	0/574	3/21	0/8	1	342	57
0/353	0/555	3/74	0/8	1	343	58
0/322	0/549	4/57	0/8	1	344	59
0/366	0/549	5/07	0/8	1	345	60
0/228	0/455	2/58	0/4	1/334	411	61
0/177	0/462	3/21	0/4	1/334	412	62
0/133	0/243	3/74	0/4	1/334	413	63
0/133	0/198	4/57	0/4	1/334	414	64
0/076	0/122	5/07	0/4	1/334	415	65
0/314	0/518	2/58	0/5	1/334	421	66
0/238	0/512	3/21	0/5	1/334	422	67
0/186	0/454	3/74	0/5	1/334	423	68
0/203	0/39	4/57	0/5	1/334	424	69
0/157	0/279	5/07	0/5	1/334	425	70
0/272	0/509	2/58	0/6	1/334	431	71
0/256	0/591	3/21	0/6	1/334	432	72
0/196	0/520	3/74	0/6	1/334	433	73
0/245	0/416	4/57	0/6	1/334	434	74
0/147	0/334	5/07	0/6	1/334	435	75
0/309	0/530	2/58	0/8	1/334	441	76
0/341	0/6	3/21	0/8	1/334	442	77
0/258	0/593	3/74	0/8	1/334	443	78
0/258	0/505	4/57	0/8	1/334	444	79
0/233	0/517	5/07	0/8	1/334	445	80

جدول 2 مقادیر عمق و طول حفره آبستگي پایین دست
حوضچه آرامش (Fahmy Abdelhaleem, 2013)

شماره	مشخصه	H_b/D_0	L_b/L_f	Fr	D_s/D_{sw}	L_s/L_{sw}
1	111	0/334	0/4	2/58	0/552	0/685
2	112	0/334	0/4	3/21	0/629	0/635
3	113	0/334	0/4	3/74	0/641	0/552
4	114	0/334	0/4	4/57	0/661	0/628
5	115	0/334	0/4	5/07	0/583	0/603
6	121	0/334	0/5	2/58	0/547	0/716
7	122	0/334	0/5	3/21	0/674	0/6
8	123	0/334	0/5	3/74	0/714	0/728
9	124	0/334	0/5	4/57	0/724	0/675
10	125	0/334	0/5	5/07	0/583	0/582
11	131	0/334	0/6	2/58	0/597	0/682
12	132	0/334	0/6	3/21	0/69	0/638
13	133	0/334	0/6	3/74	0/8	0/78
14	134	0/334	0/6	4/57	0/745	0/671
15	135	0/334	0/6	5/07	0/69	0/752
16	141	0/334	0/8	2/58	0/638	0/846
17	142	0/334	0/8	3/21	0/708	0/663
18	143	0/334	0/8	3/74	0/798	0/776
19	144	0/334	0/8	4/57	0/793	0/726
20	145	0/334	0/8	5/07	0/712	0/707
21	211	0/667	0/4	2/58	0/423	0/590
22	212	0/667	0/4	3/21	0/55	0/457
23	213	0/667	0/4	3/74	0/487	0/431
24	214	0/667	0/4	4/57	0/449	0/381
25	215	0/667	0/4	5/07	0/442	0/349
26	221	0/667	0/5	2/58	0/438	0/815
27	222	0/667	0/5	3/21	0/537	0/524
28	223	0/667	0/5	3/74	0/518	0/471
29	224	0/667	0/5	4/57	0/517	0/442
30	225	0/667	0/5	5/07	0/527	0/471
31	231	0/667	0/6	2/58	0/515	0/862
32	232	0/667	0/6	3/21	0/630	0/567
33	233	0/667	0/6	3/74	0/679	0/621
34	234	0/667	0/6	4/57	0/591	0/485
35	235	0/667	0/6	5/07	0/569	0/529
36	241	0/667	0/8	2/58	0/568	0/726
37	242	0/667	0/8	3/21	0/663	0/555
38	243	0/667	0/8	3/74	0/732	0/631
39	244	0/667	0/8	4/57	0/694	0/555

این نتایج به اختصار در جدول 3 ارائه شده است. مطابق این

جدول هر چقدر L_b/L_f کمتر باشد، یعنی بلوک‌ها به پنجه سرریز نزدیکتر باشند، تأثیر آن‌ها بر کاهش آبشستگی پایین‌دست حوضچه آرامش بیشتر است. همچنین هرچقدر بلوک‌ها بلندتر باشند، تأثیر بیشتری بر کاهش آبشستگی پایین‌دست حوضچه آرامش دارند. به طور کلی می‌توان گفت ترکیب 415 که در آن $H_b/D_0=1/334$ ، $L_b/L_f=0/4$ و $Fr=5/07$ می‌باشد، بهترین حالت برای کاهش عمق و طول حفره آبشستگی است و منجر به کاهش حدود 88 درصدی عمق حفره آبشستگی و کاهش حدود 93 درصدی طول حفره آبشستگی نسبت به حالت بدون بلوک شده است. پس از بررسی نتایج آزمایش‌های طراحی شده با روش فاکتوریل کامل، به بررسی نتایج آزمایشات طراحی شده با روش

تاگوچی پرداخته می‌شود.

جدول 4 مقادیر نسبی عمق و طول حفره آبشستگی پس از

حوضچه آرامش ناشی از حضور بلوک‌ها

L_s/L_{sw}	D_s/D_{sw}	مقادیر پارامترهای مؤثر			مشخصه	شماره
		Fr	L_b/L_f	H_b/D_0		
0/685	0/552	2/58	0/4	0/334	111	1
0/6	0/674	3/21	0/5	0/334	122	2
0/78	0/8	3/74	0/6	0/334	133	3
0/726	0/793	4/57	0/8	0/334	144	4
0/707	0/712	5/07	0/8	0/334	155	5
0/457	0/55	3/21	0/4	0/667	212	6
0/472	0/518	3/74	0/5	0/667	223	7
0/485	0/591	4/57	0/6	0/667	234	8
0/568	0/637	5/07	0/8	0/667	245	9
0/726	0/568	2/58	0/8	0/667	251	10
0/197	0/314	3/74	0/4	1	313	11
0/221	0/413	4/57	0/5	1	324	12
0/18	0/356	5/07	0/6	1	335	13
0/423	0/461	2/58	0/8	1	341	14
0/379	0/574	3/21	0/8	1	352	15
0/133	0/198	4/57	0/4	1/334	414	16
0/157	0/279	5/07	0/5	1/334	425	17
0/272	0/509	2/58	0/6	1/334	431	18
0/341	0/600	3/21	0/8	1/334	442	19
0/259	0/593	3/74	0/8	1/334	453	20
0/076	0/122	5/07	0/4	1/334	515	21
0/314	0/518	2/58	0/5	1/334	521	22
0/256	0/591	3/21	0/6	1/334	532	23
0/259	0/594	3/74	0/8	1/334	543	24
0/259	0/505	4/57	0/8	1/334	554	25

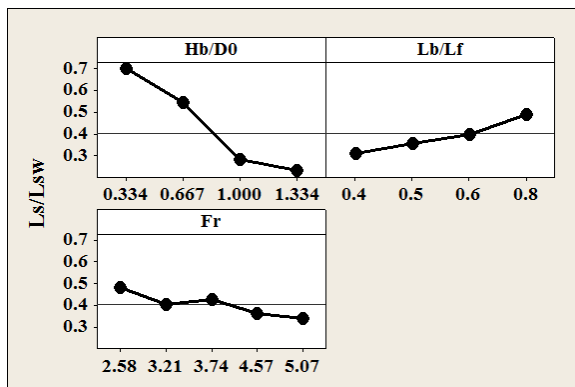
جدول 3 بهترین و بدترین ترکیب متغیرها بر عمق و طول حفره آبشستگی پس از حوضچه آرامش (فاکتوریل کامل)

L_s/L_{sw}	D_s/D_{sw}	مشخصه	شماره
	0/122	415	65
	0/192	315	45
	0/8	133	13
0/025		312	42
0/076		415	65
0/86		231	31

3- طراحی مطالعات با روش تاگوچی

در طراحی مطالعات به روش تاگوچی لازم است ضمن تعیین تابع هدف و سطح تأثیر پارامترهای مؤثر، آزمایشات طراحی، اجرا و تحلیل شوند.

در کاهش آبشستگی پایین‌دست حوضچه آرامش، "کمترین مقدار عمق و طول آبشستگی" به عنوان هدف بهینه‌سازی مدنظر قرار می‌گیرد. تعداد پارامترهای مؤثر که در آزمایشات مورد استفاده قرار گرفته‌اند، 3 عدد می‌باشد. برای طراحی آزمایش‌ها و انتخاب آرایه متعامد مناسب، باید تعداد درجات آزادی پارامترها محاسبه شود. در هر مسئله، میانگین کل 1 درجه آزادی؛ هر پارامتر 4 سطحی 3 درجه آزادی، یعنی $2 \times 3 = 6$ درجه آزادی و پارامتر 5 سطحی 4 درجه آزادی دارد. بنابراین به آرایه‌ای با حداقل



شکل 5 نمودار تأثیر پارامترها بر طول نسبی حفره آبستگی (برگرفته از Minitab 16)

- نمودار تغییرات ابعاد حفره آبستگی با تغییر H_b/D_0 و L_b/L_f بیشترین تغییرات را نشان می‌دهد و با تغییر Fr کمترین تغییرات را دارد.

4- مقایسه تاگوچی و فاکتوریل کامل

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

4-1- پیش‌بینی بهترین و بدترین ترکیب عوامل

به علت داشتن 3 پارامتر با سطوح مختلف، اگر آزمایش‌ها در حالت فاکتوریل کامل صورت گیرد، $80=4 \times 4 \times 5$ آزمایش باید انجام شود. در شکل‌های 6 و 7 نتایج 80 آزمایش فاکتوریل کامل از کمترین به بیشترین مقدار برای عمق و طول حفره آبستگی ارائه شده است. نتیجه بهترین و بدترین ترکیب بدست آمده از روش تاگوچی نیز در شکل‌های 6 و 7 نشان داده شده است. در شکل 6 کمترین عمق حفره آبستگی در روش فاکتوریل کامل مربوط به آزمایش با ترکیب 415 می‌باشد، در حالی که در روش تاگوچی مربوط به ترکیب 315 و سپس 415 است. در شکل 7 کمترین طول حفره آبستگی در روش فاکتوریل کامل مربوط به آزمایش با ترکیب 312 و سپس 415 است، از طرفی در روش تاگوچی مربوط به ترکیب 415 است.

4-2- تحلیل واریانس

میزان مشارکت هر یک از عوامل بر تابع هدف را تحلیل واریانس مشخص می‌نماید.

به عنوان نمونه در آزمایش شماره 5 که سطح 1 پارامتر اول با سطح 5 پارامتر دوم و سطح 5 پارامتر سوم ترکیب می‌شود، سطح 5 پارامتر دوم با سطح 4 آن جایگزین می‌گردد. مقادیر توابع هدف نیز با توجه به مشخصه آزمایش متناظر از جدول 2 برداشت شده است.

شکل‌های 4 و 5 میزان تأثیر سطوح عوامل مختلف بر روی توابع هدف را در نتیجه تحلیل روش تاگوچی در 25 آزمایش صورت گرفته بر اساس توابع هدف "کمترین مقدار طول و عمق نسبی حفره آبستگی" نشان می‌دهد. محور افقی این نمودارها مقدار کمی پارامتر و محور قائم مقدار تابع هدف یعنی عمق نسبی یا طول نسبی حفره آبستگی تحت تأثیر آن پارامتر است.

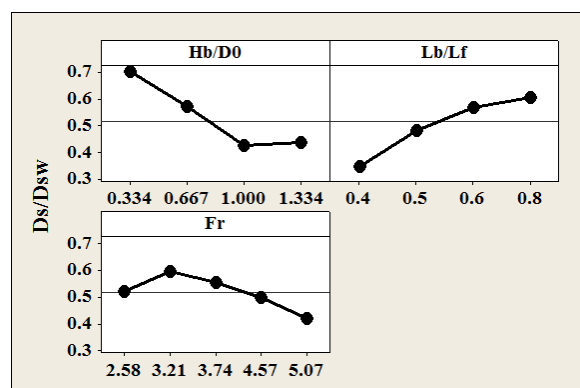
مطابق شکل‌های 4 و 5:

- اگر $1, H_b/D_0=1/334, L_b/L_f=0/4$ و $Fr=5/07$ باشد، کمترین عمق حفره آبستگی پایین‌دست حوضچه آرامش رخ داده است.

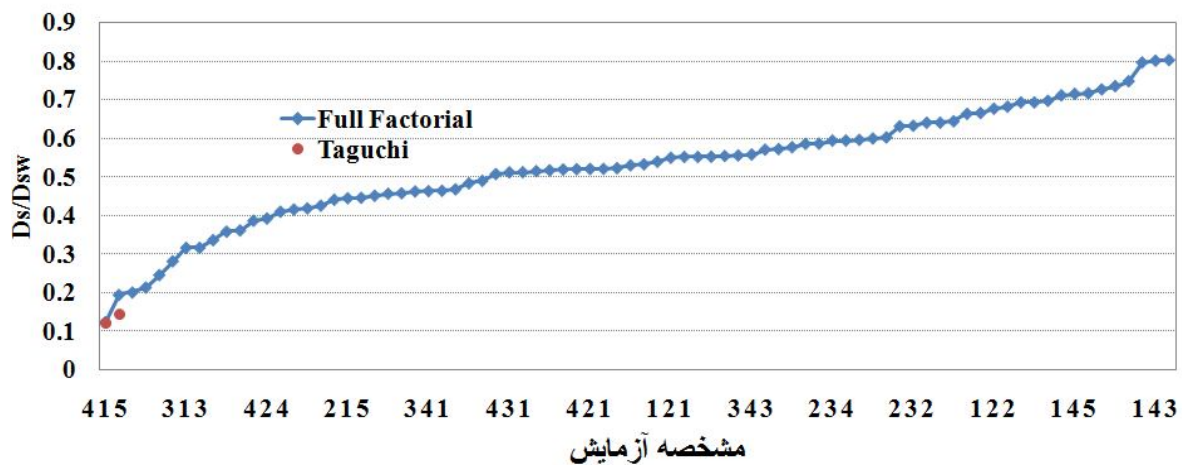
- اگر $H_b/D_0=0/334, L_b/L_f=0/8$ و $Fr=3/21$ باشد، بیشترین عمق حفره آبستگی پایین‌دست حوضچه آرامش رخ داده است.

- اگر $H_b/D_0=1/334, L_b/L_f=0/4$ و $Fr=5/07$ باشد، کمترین طول حفره آبستگی پایین‌دست حوضچه آرامش رخ داده است.

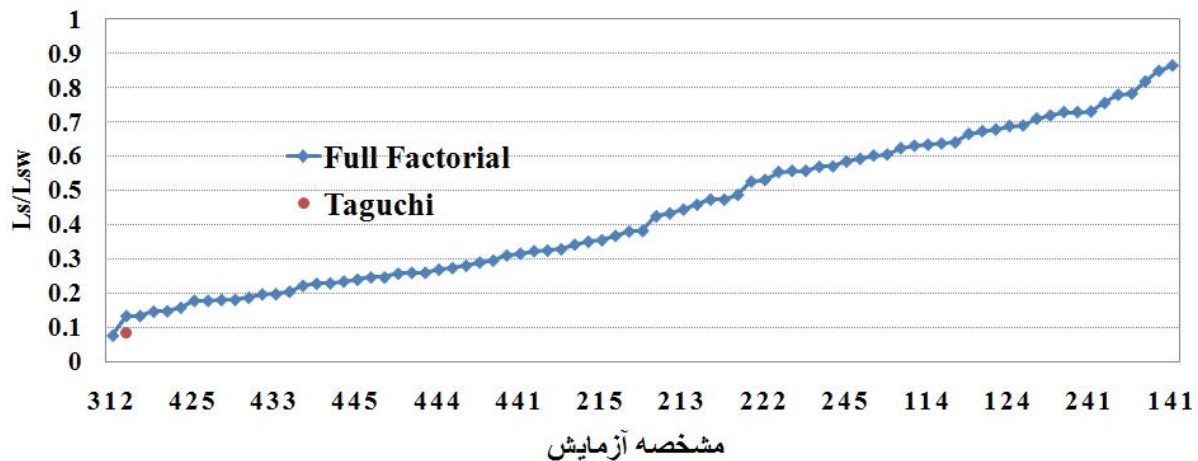
- اگر $H_b/D_0=0/334, L_b/L_f=0/8$ و $Fr=2/58$ باشد، بیشترین طول حفره آبستگی پایین‌دست حوضچه آرامش رخ داده است.



شکل 4 نمودار تأثیر پارامترها بر عمق نسبی حفره آبستگی (برگرفته از Minitab 16)



شکل 6 نتایج مرتب شده عمق حفره آبشستگی پایین دست حوضچه آرامش در کل آزمایشات فاکتوریلی کامل



شکل 7 نتایج مرتب شده طول حفره آبشستگی پایین دست حوضچه آرامش در کل آزمایشات فاکتوریلی کامل

جدول 5 مقایسه نتایج تحلیل واریانس پارامترها بر تابع هدف

طول حفره آبشستگی در روش تاگوچی و فاکتوریل کامل

رتبه بندی	درصد مشارکت		پارامتر
	فاکتوریل کامل	تاگوچی	
1	81/2	83	H_b/D_0
2	6/7	8/9	L_b/L_r
3	5/2	5/75	(Fr)
	0/07	2/1	$H_b/D_0 * L_b/L_r$
	2/6		$H_b/D_0 * Fr$
	0/02		$L_b/L_r * Fr$
	2/8		$H_b/D_0 * L_b/L_r * Fr$
	0	0/047	خطاها
	100	100	مجموع

در جدول‌های 5 و 6 نتیجه تحلیل واریانس عوامل مؤثر بر عمق و طول حفره آبشستگی پس از حوضچه آرامش در آزمایشات تاگوچی و فاکتوریل کامل باهم مقایسه شده است.

مطابق جدول 5، ارتفاع بلوک‌ها با حدود 83 درصد در روش تاگوچی و 81 درصد در فاکتوریل کامل به ترتیب بیشترین تأثیر را بر کاهش طول آبشستگی پایین دست حوضچه آرامش دارد. موقعیت بلوک‌ها با حدود 9 درصد در روش تاگوچی و 7 درصد در فاکتوریل کامل و در نهایت عدد فرود حدود 6 درصد تأثیر بر کاهش طول آبشستگی پایین دست حوضچه آرامش دارد.

جدول 6 مقایسه نتایج تحلیل واریانس پارامترها بر تابع هدف عمق حفره آبشستگی در روش تاگوچی و فاکتوریل کامل

پارامتر	درصد مشارکت		رتبه بندی	
	فاکتوریل کامل	تاگوچی	فاکتوریل کامل	تاگوچی
H_b/D_0	45	1	48/4	1
L_b/L_f	33	2	25/5	2
(Fr)	13	3	8/8	3
$H_b/D_0 * L_b/L_f$	4/5		1/9	
$H_b/D_0 * Fr$	8/9		8/9	
$L_b/L_f * Fr$	4		4	
$H_b/D_0 * L_b/L_f * Fr$	2		2	
خطاها	3/4	0	0	3/4
مجموع	100	100	100	100

بر تابع هدف مشخص نمود (Minitab, 2006). در بررسی تأثیر بلوک‌ها بر کاهش آبشستگی پایین‌دست حوضچه آرامش، فقط عوامل ارتفاع بلوک‌ها و موقعیت آنها در چهار سطح تغییر و در پنج عدد فرود مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. در صورتی که می‌توان تأثیر دو یا سه پارامتر دیگر مثلاً فاصله عرضی بلوک‌ها از هم و شیب کف را هر یک در پنج سطح تغییر، ارزیابی نمود بدون آنکه در آرایه انتخابی یا تعداد آزمایشات طراحی شده با روش تاگوچی تغییری ایجاد شود، یعنی به راحتی و با استفاده از 25 آزمایش طراحی شده با روش تاگوچی می‌توان اثر شش پارامتر پنج سطحی را بر تابع هدف بررسی نمود. اگر قرار بود پنج پارامتر و هریک در پنج سطح تغییر در آزمایشات فاکتوریل کامل وارد می‌شد باید $5^5=3125$ آزمایش انجام می‌شد.

5- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر به مقایسه نتایج مطالعات طراحی شده با روش‌های تاگوچی و فاکتوریل کامل در تأثیر پارامترهای ارتفاع و موقعیت بلوک‌های آرام کننده جریان در شرایط هیدرولیکی مختلف به منظور کنترل آبشستگی پایین‌دست حوضچه آرامش پرداخته شده است. هدف از این کار، پاسخ به این سوال بود که آیا می‌توان با روش تاگوچی تعداد مطالعات پارامتریک هیدرولیکی را به حداقل رساند و از طرفی نتایج نزدیک به نتایج انجام فاکتوریل کامل گرفت؟ همچنین چقدر صرفه جویی زمانی و به تبع آن صرفه جویی اقتصادی حاصل خواهد شد. نتایج بدست آمده از پژوهش حاضر به اختصار عبارتند از:

- روش تاگوچی، به جای 80 آزمایش، با استفاده از 25 آزمایش، با دقت خوب و نزدیک به نتایج طرح فاکتوریل کامل، ترکیب بهینه پارامترهای مؤثر بر پدیده را پیش‌بینی نموده است.

- روش تاگوچی باوجود دقت بسیار بالا در پیش‌بینی درصد مشارکت عوامل مختلف بر تابع هدف، با کاهش تعداد آزمایشات منجر به صرفه جویی 74 درصدی در زمان آزمایشات برای این پدیده هیدرولیکی شده است.

- اگر پیش از انجام آزمایش‌ها، روش تاگوچی برای

همچنین برای عمق حفره آبشستگی پارامتر ارتفاع بلوک‌ها با حدود 45 درصد در روش تاگوچی و 48 درصد در فاکتوریل کامل بیشترین تأثیر را بر کاهش عمق آبشستگی پایین‌دست حوضچه آرامش دارد. موقعیت بلوک‌ها با حدود 33 درصد در روش تاگوچی و 25 درصد در فاکتوریل کامل و در نهایت عدد فرود که حدود 13 و 5 درصد مؤثر هستند. رتبه‌بندی پارامترها به لحاظ تأثیر بر تابع هدف در هر دو روش یکسان پیش‌بینی شده است.

4-3- زمان اجرای مطالعات

همان‌طور که اشاره شد در مطالعات فاکتوریل کامل، 80 آزمایش با زمان اجرای شش ساعت برای هر آزمایش (Fahmy Abdelhaleem, 2013) انجام شده است تا بهترین و بدترین ترکیب عوامل درگیر در کاهش آبشستگی پایین‌دست حوضچه آرامش و نیز درصد مشارکت هریک از آنها بر تابع هدف بدست آید. با توجه به اینکه روش تاگوچی با 25 آزمایش نتایج قابل قبولی ارائه نموده است، لذا اگر از ابتدا مطالعات با روش تاگوچی طراحی و سپس اجرا شوند، منجر به کاهش حدود 74 درصدی در زمان آزمایشات، زمان تحلیل نتایج و در نهایت صرفه‌جویی اقتصادی می‌شود.

4-4- تعداد و سطوح عوامل قابل بررسی

در آرایه L_{25} می‌توان اثر دو تا شش پارامتر پنج سطحی را

بستر رسوبی کانال مستقیم با روش تاگوچی و GRA". مجله عمران مدرس، دوره سیزدهم، ویژه نامه بهار، ص. ص. 79-93.

رستم آبادی، م؛ صالحی نیشابوری، ع. ا. و زراتی، ا. ر. (1392). "مقایسه روش تاگوچی با طرح فاکتوریل کامل در تعیین موقعیت بهینه سازه محافظ آبشستگی در مقابل جت‌های ریزشی". مجله مهندسی آب و محیط زیست ایران، دوره 1، شماره 2، ص. ص. 35-46.

قهرمانی منجقچی، پ. (1390). "پیش‌بینی ظرفیت باربری شمع‌ها با استفاده از مدل‌سازی عددی آزمایش بارگذاری شمع". پایان‌نامه کارشناسی ارشد خاک و پی، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.

میرمحمدصادقی، م؛ مختاری، ا؛ ستوده فر، ع. و حاجیان نیا، ا. (1395). "ارزیابی عوامل موثر بر مقاومت برشی خاک ماسه ای بهسازی شده به روش بیولوژیکی با استفاده از نظریه تاگوچی". فصلنامه عمران مدرس، سال شانزدهم، شماره 3، ص. ص. 191-202.

Chaulia, P. K. and Das, R. (2008). "Process parameter optimization for fly ash brick by Taguchi method". Materials Research. 11(2), pp. 159-164.

Fahmy Abdelaleem, F. S. F. (2013). "Effect of semi-circular baffle blocks on local scour downstream clear-overfall weirs". Ain Shams Engineering Journal, 4, pp. 675-684.

Gunay, B. Hınıslioglu, S. (2011). "Traffic microsimulation scenario tests by the Taguchi method". Proceedings of the ICE-Transport. 164(1), pp. 33-42.

Minitab Inc. (2006). Minitab 15, Help, Minitab Tutorials, Session five, Design an Experiment.

Roy, K. R. (1990). *A primer on the Taguchi method*. Society of manufacturing engineers, New York, NY.

Tan, O.; Zaimoglu, A. S.; Hınıslioglu, S. and Altun, S. (2005). "Taguchi approach for optimization of the bleeding on cement-based grouts". Tunneling and Underground Space Technology. 20, pp. 167-173.

طراحی آزمایشات استفاده شود، می‌توان تعداد پارامترهای بیشتری را مورد بررسی قرار داد، بدون آنکه تعداد آزمایش‌ها تغییر کند.

6- فهرست علائم

D_0	قطر خارجی بلوک
D_s	عمق حفره آبشستگی
D_{sw}	عمق حفره آبشستگی در حالت بدون بلوک
Fr	عدد فرود
H_b	ارتفاع بلوک
L_b	فاصله بلوک از پنجه
L_f	طول حوضچه
L_s	طول حفره آبشستگی
L_{sw}	طول حفره آبشستگی در حالت بدون بلوک

7- تقدیر و تشکر

این مقاله قسمتی از طرح پژوهشی است که با حمایت مالی دانشگاه آزاد اسلامی واحد بوئین‌زهرآب انجام شده است. بدین وسیله مراتب سپاسگزاری اعلام می‌شود.

8- منابع

اجلالی، ا. (1385). "کاربرد روش تاگوچی در پیش‌بینی خواص بتن سبک‌دانه سازه ای ساخته شده از سبک‌دانه پومیس اسکندران و مقایسه نتایج حاصله با نتایج حاصل از روش انجام تمامی آزمایشات". پایان‌نامه کارشناسی ارشد سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند.

تخت کوسه، آ؛ تائبی، ا. و افیونی، م. (1390). "بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر در حذف Pb(II) از محلول‌های آبی توسط دولومیت به عنوان جاذب ارزان قیمت". چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران.

رستم آبادی، م؛ صالحی نیشابوری، ع. ا. و زراتی، ا. ر. (1392). "بهینه‌سازی شاخص‌های هندسی صفحه مستغرق در