



دانشگاه گیلان، دانشکده مهندسی آب و خاک

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک  
جلد بیست و یکم، شماره پنجم، ۱۳۹۳  
<http://jwsc.gau.ac.ir>

## بهینه‌سازی اقتصادی حوضچه‌های آرامش و اگر با مقاطع دوزنقه‌ای و مستطیلی

\* مهدی اسمعیلی‌ورکی<sup>۱</sup>، فرزانه صاحبی<sup>۲</sup>، مریم نوابیان<sup>۱</sup> و زهرا امیری<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه گیلان، دانشجوی کارشناسی ارشد گروه سازه‌های آبی، دانشگاه تبریز،

<sup>۲</sup> استادیار گروه توسعه روستایی، دانشگاه گیلان

تاریخ دریافت: ۹۲/۳/۲؛ تاریخ پذیرش: ۹۲/۶/۱۷

### چکیده

یکی از سازه‌های متداول برای استهلاک انرژی جریان‌های با سرعت زیاد در پایاب سازه‌های هیدرولیکی، حوضچه‌های آرامش می‌باشند. از میان این حوضچه‌ها، حوضچه‌های آرامش و اگر با مقاطع مستطیلی و دوزنقه‌ای به دلیل عدم نیاز به سازه تبدیل در ابتدا و انتها و نیز عملکرد هیدرولیکی مناسب تر از نظر نسبت عمق ثانویه به اولیه و افت نسبی انرژی در مقایسه با حوضچه‌های کلاسیک، می‌توانند جایگزین‌های مناسبی باشند. هدف از این مطالعه بررسی تأثیر واگرایی دیواره‌های حوضچه آرامش مستطیلی و دوزنقه‌ای بر مقدار هزینه‌های ساخت آن و افت نسبی انرژی نسبت به حوضچه کلاسیک با بهره‌گیری از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی می‌باشد. برای این منظور نتایج به دست آمده از آزمایش‌های انجام شده برای مقاطع مستطیلی و دوزنقه‌ای با شیب‌های جانبی ۱:۰/۵، ۱:۱ و ۱:۱/۵، زاویه‌های واگرایی ۳-۹ درجه در دامنه اعداد فرود ۹-۲/۶۵ مورد استفاده قرار گرفت. تجزیه و تحلیل نتایج نشان داد که در حوضچه‌های و اگر با مقاطع مستطیلی، افزایش واگرایی دیواره‌ها از ۹-۴ درجه در محدوده اعداد فرود نام‌برده، باعث افزایش راندمان پرش به میزان ۲۹-۱۰ درصد و کاهش هزینه‌های ساخت به میزان ۲۰-۴ درصد نسبت به حوضچه کلاسیک می‌شود. همچنین نتایج خروجی مدل بهینه‌سازی که تابع هدف را با الگوریتم ژنتیک حل می‌نمود، نشان داد که مقاطع دوزنقه‌ای در اعداد فرود کم‌تر از ۴، زاویه واگرایی ۳ درجه و شیب جانبی ۱:۰/۵ دارای عملکرد بهینه از نظر ساخت

\* مسئول مکاتبه: [esmaeili.varaki@yahoo.com](mailto:esmaeili.varaki@yahoo.com)

می‌باشد. مقایسه نتایج بیانگر آن است که به تدریج با افزایش عدد فرود، در همه مقاطع دوزنقه‌ای و زوایای واگرایی، هزینه‌های ساخت حوضچه به دلیل افزایش طول پرش در اثر افزایش زاویه واگرایی دیواره‌های حوضچه، افزایش می‌یابد.

**واژه‌های کلیدی:** حوضچه آرامش واگرا، راندمان پرش، هزینه‌های ساخت، الگوریتم ژنتیک

### مقدمه

حوضچه‌های آرامش از مهم‌ترین سازه‌های مستهلک‌کننده انرژی جریان می‌باشند. در این حوضچه‌ها با شکل‌گیری پرش هیدرولیکی، بخش زیادی از انرژی جریان مستهلک می‌گردد. از این رو تاکنون پژوهش‌های زیادی در خصوص پارامترهای اثرگذار هندسی و هیدرولیکی بر روی مشخصات پرش هیدرولیکی تشکیل شده در آن صورت گرفته و استانداردهای طراحی برای حوضچه آرامش با مقطع مستطیلی ارائه شده است (پترکا، ۱۹۸۳). با وجود این به دلیل اهمیت موضوع تلاش‌های زیادی برای شناخت بهتر و نیز بهبود عملکرد هیدرولیکی آن انجام شده است. از جمله روش‌های بهبود عملکرد پرش در حوضچه‌های آرامش، واگرایی دیواره‌های آن برای هماهنگی با مقطع قبل و بعد از حوضچه و حذف سازه تبدیل و نیز تغییر شکل مقطع عرضی از مستطیلی به دوزنقه‌ای می‌باشد (اسمعیلی‌ورکی، ۲۰۰۳).

مطالعات آزمایشگاهی در رابطه با اثر مجزا و هم‌زمان واگرایی دیواره‌ها و شیب جانبی بر مشخصات پرش در مقاطع دوزنقه‌ای توسط تعدادی از پژوهشگران بررسی شده است. پوزی و هسینگ (۱۹۳۸)، تأثیر شیب جانبی را بر طول پرش در حوضچه‌های دوزنقه‌ای بررسی نموده‌اند. بر طبق نتایج حاصله از آزمایش‌های انجام گرفته توسط آن‌ها کاهش شیب جانبی باعث افزایش طول پرش نسبت به پرش کلاسیک می‌شود. پژوهشگران دیگری هم‌چون ماسی (۱۹۶۶)، وانوسچک و هگر (۱۹۸۹) ضمن ارائه روابط تئوری مبتنی بر اصول پیوستگی و مومنتوم برای نسبت عمق ثانویه به اولیه در این مقاطع، خصوصیات پرش هیدرولیکی را نیز در این مقاطع به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار داده‌اند. از مهم‌ترین نتایج حاصله می‌توان به کاهش نسبت عمق ثانویه به اولیه، افزایش طول پرش در مقایسه با پرش کلاسیک و نامتقارن بودن پیشانی پرش و ایجاد گردابه‌های طولی در امتداد دیواره‌های جانبی حوضچه اشاره کرد. تأثیر هم‌زمان تغییر در زاویه واگرایی و شیب جانبی در مقاطع

ذوزنقه‌ای توسط امید و اسمعیلی ورکی (۲۰۰۵) انجام شد. نتایج حاصله نشان داد که کاهش شیب جانبی در هر زاویه واگرایی موجب کاهش نسبت عمق ثانویه به اولیه، افزایش طول پرش و افت انرژی در مقایسه با پرش مستقیم می‌گردد. همچنین افزایش زاویه واگرایی موجب کاهش نسبت عمق ثانویه به اولیه، کاهش طول پرش و افزایش افت نسبی انرژی در مقایسه با مقطع مستطیلی و ذوزنقه‌ای مستقیم خواهد شد. میزان این تغییرات، با افزایش زاویه واگرایی در مقاطع ذوزنقه‌ای برای نسبت عمق ثانویه به اولیه و افت نسبی انرژی افزایش و برای طول پرش کاهش می‌یابد. همچنین بختیاری و کاشفی پور (۲۰۰۸)، شجاعیان و همکاران (۲۰۱۱)، خصوصیات پارامترهای هیدرولیکی پرش در مقاطع واگرا را مطالعه نموده و به نتایج مشابه دست یافتند.

از آن‌جا که هزینه قابل ملاحظه‌ای از طراحی و اجرای سدها به حوضچه‌های آرامش مربوط می‌شود و نیز به خاطر اهمیت قابل توجهی که موضوع استهلاک انرژی و به تبع آن کاهش میزان فرسایش پایین دست حوضچه دارد، مبحث طراحی هیدرولیکی در راستای اهداف کاهش هزینه و افزایش راندمان حوضچه در این سازه‌ها با ارضا شرایط و رابطه‌های هیدرولیکی دارای اهمیت خواهد بود.

تانگ و میز (۱۹۸۲)، طراحی بهینه حوضچه آرامش نوع ۲ و ۳ را انجام دادند. در این مدل بهینه‌سازی هزینه‌های ساخت حوضچه به‌عنوان تابع هدف، عرض و تراز کف حوضچه به‌عنوان متغیرهای تصمیم‌گیری و معادلات یا نامعادلات هیدرولیکی، به‌عنوان محدودیت‌ها در نظر گرفته شدند. راسود (۱۹۹۴)، مدل بهینه‌سازی تانگ و میز را با پیشنهادات باسکو (۱۹۸۴) ارتقا داد و پیشنهادات طراحی باسکو (۱۹۸۴) را به‌عنوان ضوابط و معیارهای طراحی حوضچه آرامش بهینه بیان نمود. بهرامیان (۱۹۹۸)، اقدام به طراحی بهینه حوضچه آرامش تیپ ۲ و ۳ نمودند. بدین منظور مدل ریاضی بهینه‌ای تهیه شد تا با بهترین عرض و تراز برای حوضچه، ضمن ارضا همه روابط هیدرولیکی هزینه ساخت آن کمینه گردد. در انتها با استفاده از مدل تهیه شده اقدام به طراحی بهینه حوضچه آرامش توپین بات نمودند و نتایج را با نتایج مدل ارایه شده توسط تانگ و میز (۱۹۸۲)، مقایسه نمودند. مقایسه‌های به‌عمل آمده نشان داد که با بهینه‌سازی مقطع، هزینه‌های ساخت ۶ درصد کاهش می‌یابد. در ادامه با استفاده از مدل توسعه‌یافته، اقدام به طراحی بهینه حوضچه آرامش سد البرز نمودند که در این مدل نیز هزینه‌های ساخت به‌میزان ۷/۵ درصد کاهش یافت. قانعی زاده و تیموری‌راد (۲۰۰۵) طراحی حوضچه آرامش بعد از دریچه‌ها و سرریزها را مورد مطالعه قرار دادند. معادله طراحی عمومی برای طول و عمق نسبی پرش بسط داده شده و با استفاده از MLR یک معادله طراحی خاص برای

طول بهینه حوضچه آرامش مستطیلی زبر با بلوک‌های مکعبی پیشنهاد دادند. نتایج بهینه‌سازی حوضچه آرامش سد پاشاکولا توسط این پژوهشگران منجر به کاهش هزینه‌های ساخت به میزان ۸/۳ درصد شد. به‌عنوان جمع‌بندی، در روند طراحی و ساخت حوضچه‌های آرامش باید میزان هزینه‌های طراحی و اجرای سازه مورد نظر، ارضا و تأمین شرایط و روابط هیدرولیکی و نیز ارضا شرایط و محدودیت‌های سازه‌ای و طراحی، مد نظر قرار گیرد.

محدودیت‌های سازه‌ای شامل روابط تنوری یا تجربی است که اعمال آن‌ها در روند طراحی منجر به تعیین بعضی ابعاد و پارامترهای طراحی خواهد شد. متغیرهایی مانند ضخامت کف حوضچه، ضخامت دیواره‌های حوضچه، مقدار آرماتور مصرفی در بتن، هزینه‌های حمل مواد و... از این طریق به دست می‌آید.

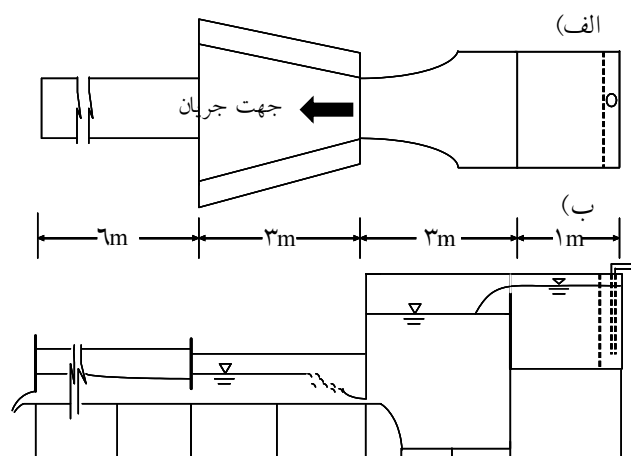
هدف از این پژوهش بررسی میزان کاهش هزینه‌های ساخت در حوضچه‌های واگرا با مقطع مستطیلی و دوزنقه‌ای نسبت به حوضچه‌های کلاسیک در زوایای واگرایی مختلف و انتخاب ابعاد بهینه با استفاده از الگوریتم ژنتیک می‌باشد.

## مواد و روش‌ها

**الف) تجهیزات آزمایشگاهی:** به منظور بررسی مشخصات پرش هیدرولیکی واگرا در مقاطع مستطیلی و دوزنقه‌ای مدل آزمایشگاهی طراحی و ساخته شده که طرح کلی آن در شکل ۱ نشان داده شد (اسمعیلی و رکی، ۲۰۰۳). این مدل شامل یک مخزن آرام‌کننده به همراه سرریز مثلثی لبه تیز برای اندازه‌گیری دبی و مخزن تأمین هد در بالادست، دریچه کشویی لبه تیز، یک کانال مستطیلی با کف و دیواره‌هایی از جنس شیشه به عرض و ارتفاع ۱ متر و طول ۶ متر و مخزن با سرریز مثلثی واسنجی شده در پایین دست می‌باشد (شکل ۱). مدل حوضچه آرامش دارای طولی به اندازه ۳ متر بود که بلافاصله بعد از دریچه کشویی مستقر گردید. این مدل به گونه‌ای طراحی شده است که امکان ایجاد زوایای واگرایی متفاوت و شیب‌های جانبی مختلف وجود داشته باشد. برای ایجاد جریان فوق بحرانی و عمق اولیه پرش ۱٫۵ از یک دریچه کشویی قابل تنظیم که در انتهای مخزن تأمین ارتفاع بالادست نصب شده بود، استفاده گردید. بعد از آماده‌سازی حوضچه آرامش برای زاویه واگرایی و شیب جانبی مورد نظر، نیمرخ جریان در طول پرش برای اعداد فرود مورد نظر با استفاده از عمق‌سنجی که دقت آن ۰/۱ میلی‌متر بود، اندازه‌گیری شد. دامنه پارامترهای اندازه‌گیری شده در آزمایش‌های انجام شده در جدول ۱ آورده شد.

جدول ۱- دامنه قرائت‌های صورت گرفته پارامترهای اندازه‌گیری شده.

حوضچه مستطیلی		حوضچه دوزنقه‌ای		واحد	پارامترهای قرائت شده
حداکثر	حداقل	حداکثر	حداقل		
۲/۲	۱/۸	۲/۳	۱/۸	سانتی‌متر	$y_1$
۲۱	۴/۴	۲۶/۱	۴/۴	سانتی‌متر	$y_2$
۸/۷۵	۲/۶۵	۹/۳۸	۲/۶۵	بدون بعد	$Fr_1$
۱۲۱	۱۱	۱۷۰	۱۱	سانتی‌متر	$L_j$
۲۱/۰۵	۵/۲۱	۴۴/۹	۵/۲۱	لیتر بر ثانیه	$Q$
۹	۳	۹	۳	درجه	$\theta$
-	-	۱/۵:۱	۰/۵:۱	بدون بعد	$Z$



شکل ۱- طرح کلی کانال آزمایشگاهی، الف) پلان و ب) نیم‌رخ طولی.

ب) استفاده از الگوریتم ژنتیک در بهینه‌سازی حوضچه آرامش: الگوریتم ژنتیک رهیافتی است که تکامل طبیعی موجودات را الگو قرار می‌دهد. اساسی‌ترین اصل تکامل، وراثت است. هر نسل، خصوصیات نسل قبلی را به ارث برده و به نسل بعد انتقال می‌دهد. این انتقال خصوصیات از نسلی به نسل بعد توسط ژن‌ها صورت می‌گیرد. مبتکر الگوریتم ژنتیک جان هلند (۱۹۷۵) با الهام گرفتن از ویژگی‌های تنوری تکامل، الگوریتم جستجویی ابداع کرد که در این الگوریتم از همان اصولی که

طبیعت فرآیند تکامل را روی نمادهای ژنی انجام می‌دهد، برای تکامل جواب‌های مربوط به یک مسأله بهینه‌سازی استفاده می‌کند. در نخستین مرحله الگوریتم ژنتیک، جمعیتی از کروموزوم‌ها به تعداد معین و به‌طور تصادفی تولید می‌شوند. هر کروموزوم بیانگر یک جواب از فضای جستجو است که فرد نام دارد. مجموعه این افراد، جمعیت یا نسل فعلی نام دارند. به هر شخص، برازندگی براساس مقدار تعیین شده توسط مقدار تابع هدف تعلق می‌گیرد. افراد با برازندگی بالا نسبت به کل جمعیت، احتمال بیش‌تری برای انتخاب شدن برای تولیدمثل دارند و در مقابل، اشخاص با برازندگی کم‌تر احتمال انتخاب کم‌تری دارند. پس از تعیین مقدار برازندگی اعضای جمعیت، می‌توان آن‌ها را با احتمالی متناظر با برازندگی نسبی‌شان انتخاب کرد و برای تولید نسل بعد ترکیب نمود. در مرحله بعد نوبت به اعمال عملگرهای پیوند و جهش می‌رسد. سپس در صورت لزوم رشته‌های اشخاص جمعیت، کدگشایی شده و تابع هدف ارزیابی و مقدار برازندگی هر فرد تعیین می‌گردد. در ادامه اشخاص مطابق با مقدار برازندگی برای جفت‌گیری انتخاب می‌شوند و فرآیند به همین ترتیب تا تولید نسل بعد ادامه می‌یابد (نوابیان، ۲۰۰۸). الگوریتم ژنتیک دارای سه عملگر اصلی می‌باشد که عبارتند از:

**عملگر انتخاب:** این عملگر، اعضا لازم برای والد شدن برای نسل آینده را تعیین می‌کند. طبیعی است که اعضای که دارای مقدار برازندگی بالایی می‌باشند، از احتمال بیش‌تری برای تولیدمثل برخوردارند.

**عملگر آمیزش:** عملگر اصلی الگوریتم ژنتیک برای تولید کروموزوم جدید عملگر آمیزش است. عملگر آمیزش، فرد جدیدی را تولید می‌کند که برخی ژن‌های هر دو والدین را داراست. عملکرد آمیزش در حقیقت مشابه همان اتفاقی است که در طبیعت می‌افتد. به این ترتیب که ژن‌های دو کروموزوم والد مبادله می‌شود تا دو کروموزوم فرزند ایجاد شود. به خاطر تغییراتی که روی کروموزوم‌های والد در نتیجه تبادل ژن‌ها صورت می‌گیرد، کروموزوم‌های فرزند دارای ژن‌های خصوصیات ژنتیکی مشترکی با والدین می‌باشند.

**عملگر جهش:** در تکامل طبیعی، جهش یک فرآیند تصادفی است که یک ژن را با ژن دیگر برای تولید یک ساختار ژنتیک جدید تعویض می‌کند. در واقع جهش مکانیسمی است که در اثر آن، یک تغییر غیرسازمان‌یافته و کاملاً تصادفی به یک رشته داده می‌شود. وجود این عملگر از آن جهت با اهمیت است که عملگر آمیزش با وجود آن‌که کروموزوم‌های متفاوت با کروموزوم‌های والد ایجاد می‌کند، اما

در عین حال کروموزوم‌های فرزند دارای ژن‌های مشترکی از هر دو والد می‌باشند. در حالی که عملگر جهش، مشخصه‌هایی را که در جمعیت والدین وجود ندارد، ایجاد می‌کند. بهینه‌یابی در واقع تعیین مناسب‌ترین مقدار متغیرهای تصمیم و تأثیرگذار بر مسأله می‌باشد که منجر به بهینه نمودن هدف مورد نظر می‌شود. بیان هدف در مدل بهینه‌سازی توسط مدل ریاضی یا عددی صورت می‌گیرد که به آن تابع هدف گویند. تابع هدف بسته به ماهیت مسأله شامل تعیین مقادیر متغیر تصمیم به منظور حداقل و یا حداکثرسازی می‌باشد. مقادیر مناسب متغیرهای تصمیم مقادیری هستند که علاوه بر حداکثر و یا حداقل‌سازی تابع هدف، محدودیت‌های حاکم بر متغیر تصمیم را نیز برآورد نماید. به منظور کمینه کردن هزینه ساخت حوضچه آرامش، تابع هدفی که بتواند هزینه‌های ساخت حوضچه آرامش را کمینه و در عین حال ملاحظات هیدرولیکی یعنی حداکثر بودن راندمان پرش را رعایت نماید، نیاز می‌باشد. تابع هدف نام‌برده را می‌توان به شرح زیر بیان نمود.

$$\text{Minimize: } C = C_{wall} + C_{bed} + C_E \quad (1)$$

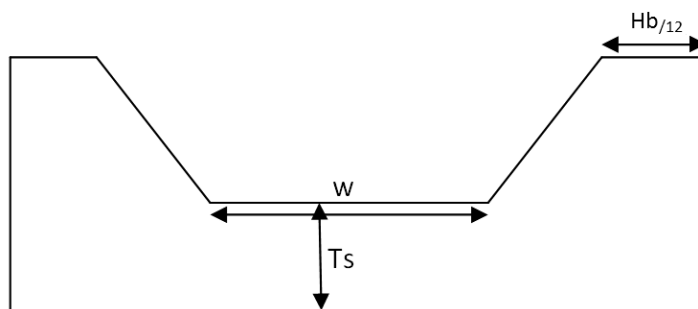
$$\text{Maximize: } \eta = \left( \frac{E_1 - E_2}{E_2} \right) \times 100 \quad (2)$$

که در آن،  $C_{wall}$ : هزینه احداث دیواره حوضچه آرامش،  $C_{bed}$ : هزینه احداث کف حوضچه آرامش،  $C_E$ : هزینه خاکبرداری،  $E_1$  و  $E_2$ : انرژی مخصوص مقاطع قبل و بعد از جهش هیدرولیکی و  $\eta$ : راندمان جهش می‌باشد.

در این پژوهش حوضچه بهینه، حوضچه‌ای با هزینه حداقل و راندمان حداکثر معرفی می‌شود که دارای عملکرد هیدرولیکی رضایت‌بخشی می‌باشد. پارامترهایی که در طراحی بهینه سازه حوضچه آرامش مؤثر می‌باشند عبارتند از عرض حوضچه، طول حوضچه، ارتفاع دیواره‌های حوضچه، تراز کف حوضچه، موقعیت و ابعاد بلوک‌ها می‌باشد. هدف حداقل نمودن هزینه‌ها و افزایش راندمان پرش می‌باشد و بدین ترتیب تنها مقطع حوضچه که تابع هدف را ارضا کند به عنوان مقطع بهینه انتخاب می‌شود و هیچ بلوکی در حوضچه در نظر گرفته نشده است.

در برآورد میزان هزینه‌های ساخت حوضچه آرامش عوامل متعددی دخالت دارند. از جمله این عوامل می‌توان به هزینه مصالح مصرفی شامل بتن، آرماتور، نوار آبنده، هزینه‌های عمومی شامل کارگر، ماشین‌آلات، حمل و نقل، هزینه‌های مربوط به قالب‌بندی، حفاری، فوندانسیون حوضچه، ضرایب

منطقه ای و... می‌باشد. در این پژوهش هزینه‌ها در قالب هزینه بتن مصرفی دیواره و کف و هزینه حفاری فوندانسیون حوضچه در نظر گرفته شده است. جز دیگر تابع هدف که راندمان پرش می‌باشد از روابط مربوطه محاسبه می‌گردد. در ادامه نحوه تعیین هر یک از اجزا تابع هدف تشریح شده است. **هزینه بتن ریزی:** دیواره‌های حوضچه آرامش مانند دیواره‌های حائل عمل کرده و تعیین ضخامت آن براساس طراحی سازه‌ای به دست می‌آید. هزینه دیواره‌ها براساس ابعاد شکل ۲ محاسبه می‌گردد. هزینه بتن ریزی حوضچه آرامش شامل مؤلفه‌های هزینه بتن دیواره و کف می‌باشد که به شرح زیر می‌باشد (اداره عمران و آبادانی آمریکا، ۱۹۸۷).



شکل ۲- مقطع عرضی سازه حوضچه آرامش.

$$C_{wallTr} = \left(\frac{1}{12} + z\right) \times u_c \times Hb^z \times \frac{lb}{\cos \theta} \quad (3)$$

$$C_{wallRe} = \left[ 2 \times u_c \left(\frac{Hb}{12} \times Hb\right) + \left(\frac{Hb}{10} \times Hb\right) \right] \times \frac{lb}{\cos \theta} = \frac{1}{30} u_c \times Hb^z \times \frac{lb}{\cos \theta} \quad (4)$$

$$C_{bedTr} = lb \times u_c \times \left[ \left( 2 \times \left( \frac{Hb}{10} + \frac{Hb}{12} + Hb \times z \right) \times t_s \right) + t_s \times \left( \frac{w_1 + w_r}{2} \right) \right] \quad (5)$$

$$C_{bedRe} = lb \times u_c \times \left[ 2 \left( \frac{Hb}{10} + \frac{Hb}{12} \right) \times t_s \right] + t_s \times \left( \frac{w_1 + w_r}{2} \right) \quad (6)$$



که در آن،  $lb$ : طول حوضچه (متر) و برابر طول پرش در نظر گرفته شده است،  $W_1$ : عرض اولیه حوضچه (متر)،  $W_2$ : عرض انتهایی حوضچه (متر)،  $\theta$ : زاویه واگرایی دیواره‌های حوضچه (درجه)،  $Z$ : شیب جانبی کانال،  $t_s$ : ضخامت بتن کف حوضچه که برابر  $0/3$  متر در نظر گرفته شده است،  $C_{wall}$  و  $C_{bed}$ : هزینه بتن در کف و دیواره و نمایه‌های  $Re$  و  $Tr$ : معرف مقطع دوزنقه‌ای و مستطیلی می‌باشد،  $u_e$ : هزینه واحد بتن‌ریزی که با توجه به فهرست‌بهای پایه آبیاری و زهکشی سال ۸۸ که شامل هزینه مصالح مصرفی شامل بتن، آرماتور، نوار آبنده، هزینه‌های عمومی و هزینه‌های مربوط به قالب‌بندی می‌باشد به‌طور متوسط برابر  $740000$  ریال برآورد شده است،  $Hb$ : ارتفاع دیواره‌ها که برای محاسبه آن از رابطه ۷ استفاده شده است. با محاسبه مجموع هزینه‌های بتن کف و دیواره کل هزینه بتن‌ریزی محاسبه می‌گردد (اداره عمران و آبادانی آمریکا، ۱۹۸۷).

$$Hb = y_2 + 0/1 (y_1 + y_2) \quad (7)$$

**هزینه خاکبرداری:** با وجود این‌که هزینه‌های خاکبرداری به نسبت هزینه‌های بتن‌ریزی بسیار اندک است اما برای تدقیق مطالعات در محاسبه هزینه‌ها علاوه بر هزینه‌های بتن‌ریزی هزینه‌های مربوط به خاکبرداری نیز در نظر گرفته شده است. مقطع خاکبرداری با در نظر گرفتن سکوها برای پایداری شیب جانبی با زاویه  $45^\circ$  در نظر گرفته شده است. کف حوضچه نیز با بیش‌ترین حجم خاکبرداری به اندازه  $(Hb + 0/3)$  پایین‌تر از کف رودخانه در نظر گرفته شد. برای محاسبه هزینه خاکبرداری  $C_E$  از رابطه زیر استفاده شد (اداره عمران و آبادانی آمریکا، ۱۹۸۷):

$$C_E = u_e \times lb \times \left[ (Hb + 0/3) \times \left( \frac{W_1 + W_2}{2} \right) + (Hb + 0/3)^2 \right] \quad (8)$$

**راندمان پرش هیدرولیکی:** حوضچه آرامشی بهینه است که حداقل هزینه ساخت و حداکثر راندمان پرش را داشته باشد. برای تعیین راندمان پرش ( $\eta$ ) از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$\eta = \left( \frac{E_1 - E_2}{E_2} \right) \times 100 \quad (9)$$

که در آن  $E_1$  و  $E_2$  انرژی مخصوص به‌ترتیب در مقاطع ابتدا و انتهای پرش می‌باشند. همچنین برای تعیین پارمترهای مورد نیاز برای طراحی حوضچه آرامش کلاسیک از رابطه‌های زیر استفاده شده است:

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2}(\sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 1) \quad (10)$$

$$lb = L_j = 6/1 y_2 \quad (11)$$

استخراج معادلات تجربی مورد نیاز: نتایج مطالعات صورت گرفته توسط پژوهشگران در خصوص مشخصات پرش هیدرولیکی واگرا نشان داده است که با به کارگیری اصول پیوستگی، مومنتوم و استفاده از فرضیاتی که مهم‌ترین آن‌ها به کارگیری تابع مناسب برای نیمرخ طولی سطح آب در امتداد می‌باشد، می‌توان رابطه تئوری- تجربی که تابعی از طول نسبی پرش است، برای برآورد نسبت عمق ثانویه به اولیه ارایه نمود (امید و اسمعیلی ورکی، ۲۰۰۵). با توجه به عدم امکان حل صریح معادلات تئوری استخراج شده برای نسبت عمق ثانویه به اولیه در پرش واگرا از یک سو و نبود روابطی تجربی برای برآورد طول نسبی پرش از سوی دیگر، با استفاده از نتایج آزمایشگاهی و تجزیه و تحلیل آماری، رابطه‌های ۱۲ تا ۱۵ برای نسبت عمق ثانویه به اولیه و طولی نسبی پرش ارایه گردید. مقایسه‌های به عمل آمده نشان داد که رابطه‌های نام‌برده با دقت بالایی قادر به پیش‌بینی پارامترهای پرش می‌باشند. در نمودارهای شکل‌های ۳ و ۴، ارزیابی عملکرد مدل‌ها در پیش‌بینی نسبت عمق ثانویه به اولیه و طول نسبی پرش در مقاطع مستطیلی و دوزنقه‌ای آورده شده است. در این شکل‌ها نمایه‌های Exp و Model به ترتیب معرف داده‌های آزمایشگاهی و خروجی مدل‌های رگرسیونی می‌باشند. لازم به ذکر است که در این رابطه‌ها  $\theta$  بر حسب رادیان می‌باشد.

رابطه‌های استخراج شده برای مقطع دوزنقه‌ای

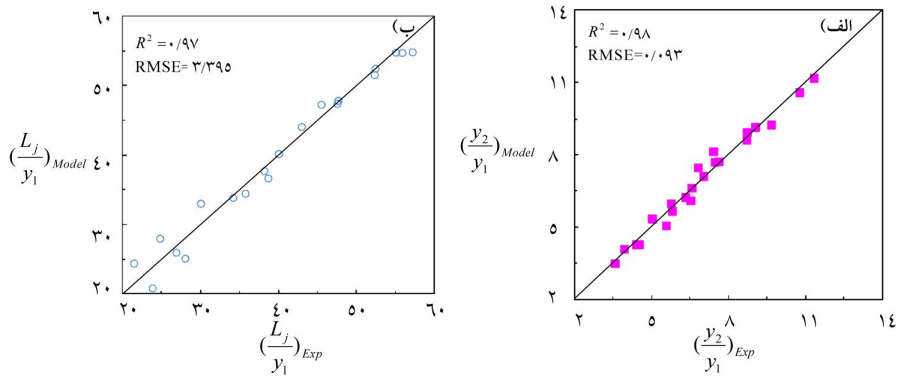
$$\frac{y_2}{y_1} = 1/771 + 0/937Fr_1 - 8/5371\theta - 0/556Z \quad (12)$$

$$\frac{L_j}{y_1} = -20/231 + 8/471 + Fr + 102/79\theta + 8/527Z \quad (13)$$

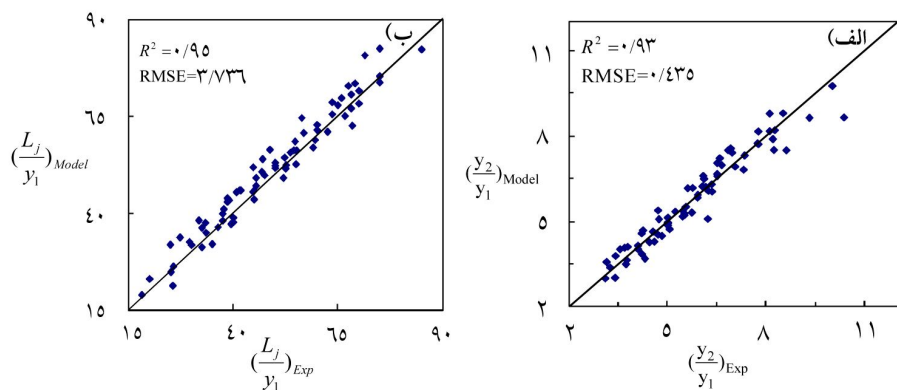
رابطه‌های استخراج شده برای مقطع مستطیلی

$$\frac{y_2}{y_1} = 0.582 \times \theta^{-0.2227} \times Fr^{1.0778} \quad (14)$$

$$\frac{L_j}{y_1} = 2.23 + \frac{y_2}{y_1}^{-0.7454} \times \theta^{-0.4197} \times Fr^{1.8681} \quad (15)$$



شکل ۳- ارزیابی عملکرد مدل‌های رگرسیونی در پیش‌بینی پارامترهای پرش واگرا در مقطع مستطیلی، الف) نسبت عمق ثانویه به اولیه و ب) طول نسبی جهش.



شکل ۴- ارزیابی عملکرد مدل‌های رگرسیونی در پیش‌بینی پارامترهای پرش واگرا در مقطع ذوزنقه‌ای، الف) نسبت عمق ثانویه به اولیه و ب) طول نسبی جهش.

در الگوریتم ژنتیک، ابتدا جمعیت اولیه‌ای به صورت تصادفی تولید می‌گردد. سپس با تبدیل اعداد به صورت اعداد باینری در مبنای ۲، مقدار تابع هدف برای هر کروموزوم محاسبه می‌شود. پس از این مرحله برترین کروموزوم‌ها با توجه به تابع هدف و بر حسب معیار عملگر گزینش، انتخاب و در مرحله بعد به تولید جمعیت توسط عملگرهای تزویج و جهش اقدام می‌شود. پس از تولید جمعیت توسط کروموزوم‌های برتر نسل قبل، عمل انتخاب کروموزوم‌های برتر بر حسب تابع هدف در نظر گرفته شده از جمعیت جدید و نسل قبل، انجام شده و کروموزوم‌های نسل جدید را تولید می‌کنند. این عملیات برای تعداد نسل‌های تعیین شده برای رسیدن به جمعیت بهینه ادامه می‌یابد. پارامترهای حل الگوریتم ژنتیک شامل طول کروموزوم، تعداد جمعیت اولیه، تعداد نسل، احتمال‌های جهش و تزویج، نحوه اعمال عملگرهای گزینش، تزویج، جهش و تعداد فرزند ایجاد شده در ترکیب دو والد برتر و نحوه جایگزینی آن در نسل بعد بوده که باید تعیین گردند (جدول ۲).

طول کروموزوم نقش مؤثری در زمان محاسبه‌ها دارد به طوری که در برخی موارد با تغییر مقیاس اعداد، طول کروموزوم را کاهش می‌دهند. طول کروموزوم برای متغیرهای تصمیم مدل بهینه‌یابی آرایه شده با توجه به مقادیر حداکثر و حداقل آن‌ها از رابطه ۱۶ تعیین شد.

$$2^{mj-1} \leq (b_j - a_j) \times 10^0 \leq 2^m - 1 \quad (16)$$

که در آن،  $m_j$ : تعداد بیت مورد نیاز و  $a_j$  و  $b_j$ : حداقل و حداکثر مقدار هر متغیر تصمیم می‌باشند. تعداد بیت مورد نیاز برای متغیرهای تصمیم که شامل عدد فرود، زاویه واگرایی و شیب جانبی بود از رابطه بالا به ترتیب ۲۱، ۲۱ و ۱۹ به دست آمد. بنابراین طول کروموزوم که حاصل مجموع تعداد بیت‌های متغیرهای تصمیم است، برابر با ۶۱ تعیین گردید. همچنین در این الگوی حل، عملگرهای گزینش، تزویج و جهش به ترتیب به روش‌های تورنمنت، یکنواخت و خزشی انتخاب و برای تولید یک فرزند از ترکیب دو والد برتر و جایگزینی و تکرار کروموزوم برتر در نسل بعد استفاده شد.

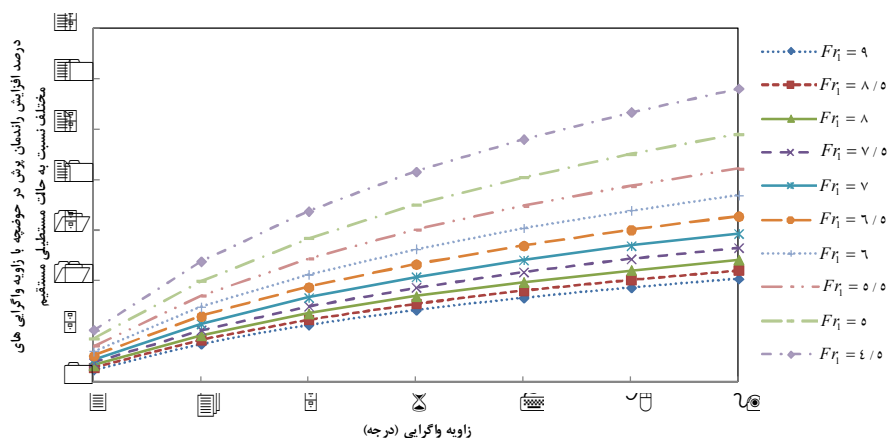
جدول ۲- مقادیر پارامترهای ژنتیکی اولیه برای بهینه‌سازی پارامترهای توابع عضویت.

احتمال جهش	احتمال تزویج	تعداد نسل	جمعیت اولیه
۰/۱	۰/۸	۳۰۰	۱۰۰

### تجزیه و تحلیل نتایج

برای مقایسه عملکرد حوضچه مستطیلی در زوایای واگرایی مختلف با ارضا روابط هیدرولیکی و هدف مورد نظر، از نتایج استخراج شده برای حوضچه فیزیکی ساخته شده برای ۷ زاویه واگرایی از ۳-۹ درجه و نیز روابط هیدرولیکی و هزینه های محاسبه شده استفاده گردید. به منظور ارزیابی نتایج حاصله به ازای گام های تغییرات ۱ درجه برای زاویه و ۰/۵ واحد برای عدد فرود مقادیر تغییرات راندمان و هزینه های حوضچه ها محاسبه گردید. نمونه ای از نتایج محاسبه های نام برده برای زوایای واگرایی مختلف در عدد فرود ۸ در جدول ۳ نشان داده شده است. همچنین مقادیر کاهش هزینه ساخت حوضچه های واگرا و تغییرات آن نسبت به حالت مستطیلی کلاسیک برای زاویه واگرایی های مختلف در جدول های ۴ و ۵ منعکس شده است. در نمودار شکل ۵ مقایسه راندمان پرش در تمامی زاویه های واگرایی و اعداد فرود برای حوضچه مستطیلی مستقیم و واگرا و تغییرات آن ها آورده شده است.

تجزیه و تحلیل نتایج نشان داد که با افزایش زاویه واگرایی از ۹-۴ درجه، هزینه ساخت حوضچه کاهش و راندمان پرش افزایش می یابد. مقایسه های صورت گرفته نشان داد که هزینه ساخت حوضچه آرامش با زاویه واگرایی ۹ درجه دارای کمترین مقدار بوده و نسبت به حوضچه کلاسیک ۲۰ درصد کاهش یافته است. همچنین ارزیابی نتایج بیانگر آن است که محدوده زاویه واگرایی ۳-۰ درجه، افزایش زاویه واگرایی منجر به افزایش هزینه های ساخت به مقدار ۴-۲ درصد در مقایسه با حوضچه کلاسیک می گردد.



شکل ۵- میزان افزایش راندمان پرش حوضچه های واگرا نسبت به حوضچه کلاسیک در زوایای واگرایی مختلف (درصد).

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک جلد (۲۱)، شماره (۵) ۱۳۹۳

جدول ۳- محاسبات مربوط به هزینه حوضچه و راندمان پرش در حوضچه مستطیلی نمونه در عدد فرود ۸ عمق اولیه ۰/۰۲ متر و زوایای واگرایی مختلف.

زاویه واگرایی (درجه)	$\gamma/\gamma_1$	$L_j$ (متر)	Hb (متر)	کل هزینه ساخت (تومان)	راندمان پرش (درصد)	درصد افزایش راندمان پرش به‌ازای هر درجه افزایش زاویه واگرایی (درصد)	درصد افزایش راندمان پرش در حوضچه واگرا با زوایای واگرایی مختلف نسبت به حالت مستطیلی مستقیم (درصد)	درصد کاهش هزینه ساخت حوضچه نسبت به حالت مستطیلی مستقیم (درصد)
۰	۱۰/۹	۱/۳۲	۰/۵۷	۳۲۵۳۳/۸	۶۶/۴	-	**	**
۳	۱۰/۶	۱/۲۹	۰/۵۷	۳۳۶۱۵/۷	۶۷/۴	۱/۶	۲	**
۴	۹/۹	۱/۲۰	۰/۵۵	۳۱۱۷۴/۰	۶۹/۴	۲/۹	۵	۴/۲
۵	۹/۴	۱/۱۳	۰/۵۴	۲۹۵۰۵/۴	۷۰/۹	۲/۱	۷	۹/۳
۶	۹/۱	۱/۰۸	۰/۵۴	۲۸۲۸۰/۹	۷۲/۰	۱/۶	۸	۱۳/۱
۷	۸/۷	۱/۰۴	۰/۵۳	۲۷۳۴۰/۱	۷۲/۹	۱/۳	۱۰	۱۶/۰
۸	۸/۵	۱/۰۱	۰/۵۳	۲۶۵۹۴/۰	۷۳/۷	۱/۱	۱۱	۱۸/۳
۹	۸/۳	۰/۹۸	۰/۵۲	۲۵۹۸۸/۸	۷۴/۴	۰/۹	۱۲	۲۰/۱

جدول ۴- میزان کاهش هزینه ساخت حوضچه‌های مستطیلی به‌ازای افزایش زاویه‌های واگرایی مختلف.

تغییر زاویه واگرایی (درجه)	درصد کاهش هزینه ساخت حوضچه به‌ازای هر درجه افزایش زاویه واگرایی
۳-۴	۷
۴-۵	۵
۵-۶	۴
۶-۷	۳
۷-۸	۳
۸-۹	۲

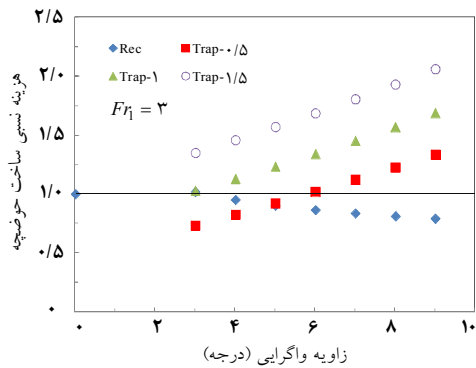
جدول ۵- میزان کاهش هزینه ساخت حوضچه‌های مستطیلی واگرا نسبت به حوضچه کلاسیک در زوایای واگرایی مختلف.

زاویه واگرایی (درجه)	درصد کاهش هزینه ساخت حوضچه نسبت به حالت مستطیلی مستقیم
۴ درجه	۴
۵ درجه	۹
۶ درجه	۱۳
۷ درجه	۱۶
۸ درجه	۱۸
۹ درجه	۲۰

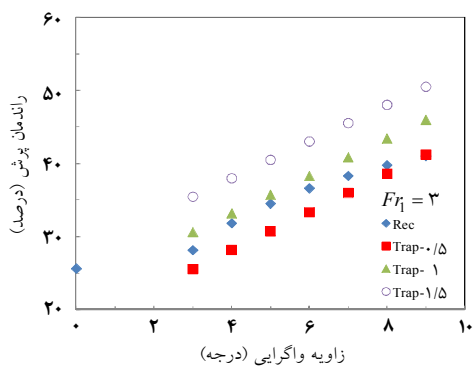
بررسی‌های انجام شده نشان داد که راندمان پرش هیدرولیکی در دامنه اعداد فرود ۹-۸/۵، به ترتیب ۲۹-۱۰ درصد نسبت به حوضچه کلاسیک بیش‌تر می‌گردد. مقایسه نتایج بیانگر آن که است افزایش زاویه واگرایی باعث افزایش راندمان پرش به میزان ۳۰-۵ درصد در اعداد فرود کم‌تر از ۶ و ۱۰-۱ درصد در اعداد فرود بالاتر می‌شود.

به منظور ارزیابی تأثیر تغییر هم زمان زاویه واگرایی و شیب جانبی بر هزینه ساخت حوضچه آرامش دوزنقه‌ای و راندمان پرش هیدرولیکی، با استفاده از کدنویسی انجام شده برای الگوریتم ژنتیک با زبان فرترن، مدل بهینه‌سازی در زوایای واگرایی ۳ تا ۹ و شیب‌های جانبی ۱:۰/۵ تا ۱:۱/۵ اجرا گردید. بررسی‌های انجام شده نشان داد که شرایط بهینه هندسه حوضچه متناسب با اعداد فرود، متفاوت می‌باشد. به منظور درک بهتر از تغییرات پارامترهای مورد نظر، نمودارهای مقایسه بین هزینه‌های ساخت و نیز راندمان پرش در شکل‌های ۶ تا ۱۱ و جدول‌های ۶ و ۷ ارائه شد.

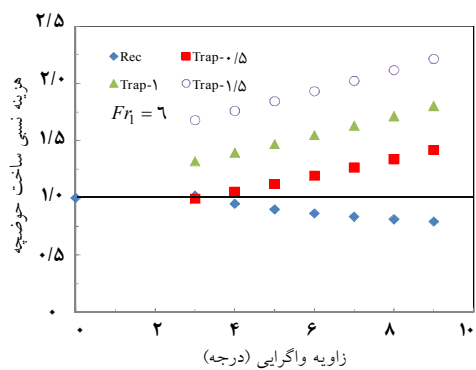
همان‌طور که در شکل‌های نام‌برده مشخص است، در اعداد فرود کم‌تر از ۴، زاویه واگرایی ۳ درجه و شیب جانبی ۱:۰/۵ دارای کم‌ترین هزینه ساخت می‌باشد. به تدریج با افزایش عدد فرود، در همه مقاطع دوزنقه‌ای و زوایای واگرایی مورد بررسی، هزینه‌های ساخت حوضچه آرامش افزایش می‌یابد. بررسی‌های انجام شده نشان داد که حوضچه‌های آرامش دوزنقه‌ای با شیب‌های ۱:۱ و ۱:۱/۵، از نظر راندمان پرش مناسب بوده ولی به دلیل افزایش طول حوضچه آرامش در اثر واگرایی دیواره‌های حوضچه، دارای هزینه ساخت بیش‌تری می‌باشند.



شکل ۶- مقایسه تغییرات هزینه نسبی حوضچه آرامش واگرا با مقاطع مستطیلی و دوزنقه‌ای در عدد فرود اولیه ۳.

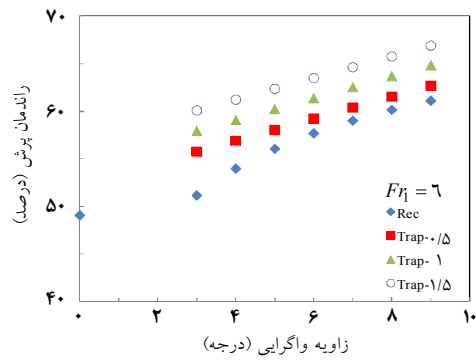


شکل ۷- مقایسه تغییرات راندمان پرش هیدرولیکی واگرا با مقاطع مستطیلی و دوزنقه‌ای در عدد فرود اولیه ۳.

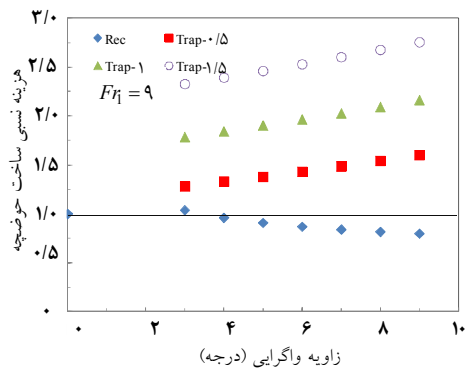


شکل ۸- مقایسه تغییرات هزینه نسبی حوضچه آرامش واگرا با مقاطع مستطیلی و دوزنقه‌ای در عدد فرود اولیه ۶.

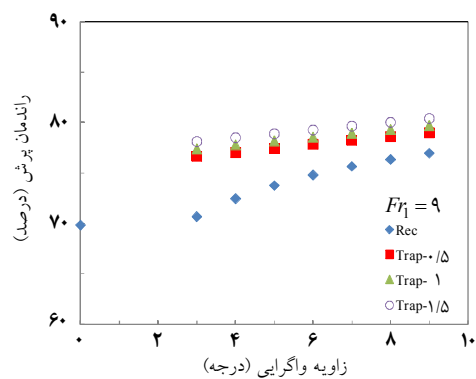




شکل ۹- مقایسه تغییرات راندمان پرش هیدرولیکی واگرا با مقاطع مستطیلی و دوزنقه‌ای در عدد فرود اولیه ۶.



شکل ۱۰- مقایسه تغییرات هزینه نسبی حوضچه آرامش واگرا با مقاطع مستطیلی و دوزنقه‌ای در عدد فرود اولیه ۹.



شکل ۱۱- مقایسه تغییرات راندمان پرش هیدرولیکی واگرا با مقاطع مستطیلی و دوزنقه‌ای در عدد فرود اولیه ۹.

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک جلد (۲۱)، شماره (۵) ۱۳۹۳

جدول ۶- محاسبه‌های مربوط به هزینه حوضچه و راندمان پرش در حوضچه نمونه دوزنقه‌ای با شیب جانبی ۰/۵:۱ در عدد فرود ۸، عمق اولیه ۰/۰۲ متر و زاویه‌های واگرایی مختلف.

زاویه واگرایی (درجه)	$Y_2/Y_1$	$L_j$ (متر)	Hb (متر)	کل هزینه ساخت (تومان)	راندمان پرش (درصد)	درصد افزایش راندمان پرش به‌ازای هر درجه افزایش زاویه واگرایی (درصد)	درصد افزایش راندمان پرش در حوضچه واگرا با زاویه‌های واگرایی مختلف نسبت به حالت مستطیلی (درصد)	درصد افزایش هزینه ساخت در حوضچه نسبت به حالت مستطیلی مستقیم در زاویه واگرایی‌های مختلف (درصد)
۰	۱۰/۸۲	۱/۳۲	۰/۵۷۳	۳۲۵۳۴	۶۶/۴۰			
۳	۸/۳۷	۱/۱۴	۰/۵۲۴	۳۹۵۲۱	۷۳/۹۴	۱۱/۴۰	۱۱/۴۰	۲۱/۴۸
۴	۸/۱۹	۱/۱۸	۰/۵۲۰	۴۱۱۱۵	۷۴/۵۲	۰/۷۹	۱۲/۲۹	۲۶/۳۸
۵	۸/۰۲	۱/۲۲	۰/۵۱۷	۴۲۷۷۶	۷۵/۱۰	۰/۷۸	۱۳/۱۶	۳۱/۴۸
۶	۷/۸۴	۱/۲۵	۰/۵۱۳	۴۴۵۰۷	۷۵/۶۸	۰/۷۷	۱۴/۰۳	۳۶/۸۰
۷	۷/۶۷	۱/۲۹	۰/۵۱۰	۴۶۳۱۲	۷۶/۲۵	۰/۷۶	۱۴/۸۹	۴۲/۳۵
۸	۷/۴۹	۱/۳۲	۰/۵۰۶	۴۸۱۹۶	۷۶/۸۲	۰/۷۵	۱۵/۷۵	۴۸/۱۴
۹	۷/۳۱	۱/۳۶	۰/۵۰۳	۵۰۱۶۴	۷۷/۳۹	۰/۷۴	۱۶/۶۰	۵۴/۱۹

جدول ۷- محاسبه‌های مربوط به هزینه حوضچه و راندمان پرش در حوضچه نمونه دوزنقه‌ای با شیب جانبی ۱:۰/۵ در عدد فرود ۸، عمق اولیه ۰/۰۲ متر و زاویه‌های واگرایی مختلف.

زاویه واگرایی (درجه)	$Y_2/Y_1$	$L_j$ (متر)	Hb (متر)	کل هزینه ساخت (تومان)	راندمان پرش (درصد)	درصد افزایش راندمان پرش به‌ازای هر درجه افزایش زاویه واگرایی (درصد)	درصد افزایش راندمان پرش در حوضچه واگرا با زاویه‌های واگرایی مختلف نسبت به حالت مستطیلی مستقیم (درصد)	درصد افزایش هزینه ساخت در حوضچه نسبت به حالت مستطیلی مستقیم (درصد)
۰	۱۰/۸۲	۱/۳۲	۰/۵۷۳	۳۲۵۳۳/۷۹	۶۶/۴			
۳	۷/۸۶	۱/۳۱	۰/۵۱۴	۷۰۴۳۰/۱۲	۷۵/۶۶	۱۴	۱۴	۱۱۶/۴۸
۴	۷/۶۹	۱/۳۵	۰/۵۱۰	۷۲۵۲۶/۳۵	۷۶/۲۲	۰/۷۴	۱۴/۸۴	۱۲۲/۹۳
۵	۷/۵۱	۱/۳۹	۰/۵۰۷	۷۴۶۹۲/۲۳	۷۶/۷۸	۰/۷۳	۱۵/۶۹	۱۲۹/۵۸
۶	۷/۳۳	۱/۴۲	۰/۵۰۳	۷۶۹۳۲/۵۹	۷۷/۳۴	۰/۷۳	۱۶/۵۳	۱۳۶/۴۷
۷	۷/۱۶	۱/۴۶	۰/۵	۷۹۲۵۲/۳۶	۷۷/۹	۰/۷۲	۱۷/۳۴	۱۴۳/۶
۸	۶/۹۸	۱/۴۹	۰/۴۹۶	۸۱۶۵۶/۶۱	۷۸/۴۵	۰/۷۱	۱۸/۲	۱۵۰/۹۹
۹	۶/۸۱	۱/۵۳	۰/۴۹۲	۸۴۱۵۰/۵	۷۹	۰/۷۰	۱۹/۰۴	۱۵۸/۶۶

### نتیجه گیری کلی

یکی از روش های کاهش هزینه های احداث حوضچه های آرامش با پرش هیدرولیکی به عنوان یکی از متداول ترین مستهلک کننده های انرژی، واگرایی دیواره های حوضچه در جهت هماهنگی با مقاطع بالادست و پایین دست و حذف سازه تبدیل می باشد. در این پژوهش، تأثیر واگرایی دیواره های حوضچه های آرامش با مقطعی مستطیلی و دوزنقه ای بر کاهش هزینه های اجرایی و نیز عملکرد استهلاک انرژی در آن مورد بررسی قرار گرفت. همچنین تابعی دوزنقه ای برای کمینه نمودن هزینه های ساخت و بیشینه نمودن عملکرد افت انرژی در حوضچه آرامش دوزنقه ای تعریف و با استفاده از الگوریتم ژنتیک، مسأله برای زوایای واگرایی ۳-۹ درجه، اعداد فرود ۳-۹/۵ و شیب های جانبی ۱:۰/۵، ۱:۱ و ۱:۱/۵، بهینه گردید. تجزیه و تحلیل نتایج در مقطع مستطیلی نشان داد که در محدوده زاویه واگرایی ۳-۰ درجه، افزایش زاویه واگرایی اگرچه طول و ارتفاع حوضچه را در مقایسه با حوضچه کلاسیک کاهش می دهد ولی مقدار تأثیر آن در مقایسه با افزایش هزینه ناشی از افزایش سطح پلان حوضچه آرامش در اثر واگرایی، کم تر بوده و در نتیجه هزینه های ساخت به مقدار ۴-۲ درصد در مقایسه با حوضچه کلاسیک افزایش می یابد اما راندمان پرش در مقایسه با حوضچه کلاسیک بیش تر خواهد شد. از طرفی افزایش زاویه واگرایی از ۹-۴ درجه، منجر به کاهش هزینه ساخت حوضچه به میزان ۲۰-۴ درصد (به نسبت عدد فرود جریان در حوضچه) در مقایسه با حوضچه کلاسیک شده و راندمان پرش بسته به مقدار زاویه به میزان ۳۰-۵ درصد در اعداد فرود کم تر از ۶ و در اعداد فرود بالاتر به میزان ۱۰-۱ درصد افزایش می یابد. مقایسه نتایج خروجی مدل بهینه سازی در مقطع دوزنقه ای نیز نشان داد که در اعداد فرود کم تر از ۴، زاویه واگرایی ۳ درجه و شیب جانبی ۱:۰/۵ دارای حداقل هزینه ساخت می باشد. به تدریج با افزایش عدد فرود، در همه مقاطع دوزنقه ای و زوایای واگرایی مورد بررسی، هزینه های ساخت حوضچه به دلیل افزایش طول پرش با افزایش زاویه واگرایی، افزایش می یابد. بنابراین انتخاب مقطع دوزنقه ای با زوایای واگرایی بیش تر از ۳ اگرچه دارای راندمان اتلاف انرژی بیش تری می باشد ولی هزینه های ساخت حوضچه آرامش را افزایش می دهد.

## منابع

1. Basco, D. 1984. Discussion of optimal design of stilling basins for overflow Spillways by Yeou-Koung Tung and Larry W. Mays. J. Hydraul. Eng. 110: 1. 79-82.
2. Bahramian, S.H. 1998. Optimal Design of Type II and III stilling basins. A Thesis for Partial Fulfillment of Master of Science Degree in Civil Engineering, Tarbiat Modarres University, 131p. (In Persian)
3. United States Department of Interior, Bureau of Reclamation. 1987. Design of Small Dams: A Water Resources Technical Publication. Third Edition. U.S. Government Printing Office, Denver, Colorado, 860p.
4. Bakhtiari, M., and Kashefipour, M. 2008. A Survey in Hydraulic properties of Hydraulic Jump Parameters on Diverging Sections. 4<sup>th</sup> National Congress of Civil Engineering, April, University of Tehran, 8p. (In Persian)
5. Esmaili Varaki, M. 2003. Theoretical and Experimental Study of Gradually Diverging Hydraulic Jump in Trapezoidal and rectangular stilling basin, A Thesis for Partial Fulfillment of Master of Science Degree in Hydraulic Structure, University of Tehran, Iran, 141p. (In Persian)
6. Ghanehezadeh, M., and Teimourirad, H. 2005. Optimal Design of stilling basins. First National Congress of Dam and Hydraulic Structures, Karaj Azad University, 9p. (In Persian)
7. Holland, J. 1975. Adaptation in natural and artificial systems. MIT Press, Cambridge Mass, 211p.
8. Massey, B.S. 1966. Hydraulic jump in trapezoidal channel: an improved method. Water Power. 13: 232-233.
9. Navabian, M. 2008. Optimization of furrow fertigation design and management to decrease nitrate pollution, A Thesis for Partial Fulfillment of the requirements for degree of doctor of philosophy in Irrigation and drainage engineering, University of Tehran, Iran, 198p. (In Persian)
10. Omid, M.H., and Esmaili Varaki, M. 2005. Theoretical and Experimental Study of Gradually Diverging Hydraulic Jump in Trapezoidal Sections, J. Sci. Technol. Agric. Natur. Resour. 9: 2. 1-13.
11. Peterka, A.J. 1983. Hydraulic Design of Stilling Basin and Energy Dissipaters. Engineering Monograph. No. 25, U. S. Bureau of Reclamation, 222p.
12. Posey, C.J., and Hsing, P.S. 1938. Hydraulic jump in trapezoidal channel. Eng. News-Record. 797p.
13. Rathod, R.D. 1994. Development of Procedure for Optimized Design of Stilling Basin. National Symposium on Recent Trends in Design of Hydraulic Structures. University of Roorkee, Dept. of Civil Engineering, India, March 18-19.

14. Shojaeean, Z., Hosseinzadeh Delir, A., Farsadizadeh, D., and Salmasi, F. 2011. Investigation of Hydraulic Jump Properties in Diverging Rectangular Sections with Adverse Slope. *J. Water Soil Sci. Tabriz Univ.* 21: 3. 50-60. (In Persian)
15. Tung, Y.K., and Mays, L.W. 1982. Optimal design of stilling basins for overflow spillway. *J. Hydr. Divi.* 108: 10. 1163-1178.
16. Wanoschek, R., and Hager, W.H. 1989. Hydraulic jump in trapezoidal channel. *J. Hydraul. Res.* 27: 3. 429-445.



Gorgan University of Agricultural  
Sciences and Natural Resources

*J. of Water and Soil Conservation, Vol. 21(5), 2015*  
<http://jwsc.gau.ac.ir>

## **Economical optimization of diverging stilling basins with rectangular and trapezoidal sections**

**\*M. Esmaeili Varaki<sup>1</sup>, F. Sahebi<sup>2</sup>, M. Navabian<sup>1</sup> and Z. Amiri<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Assistant Prof., Dept. of Water Engineering, University of Guilan,

<sup>2</sup>M.Sc. Student, Dept. of Water Structure, University of Tabriz,

<sup>3</sup>Assistant Prof., Dept. of Rural Development, University of Guilan

Received: 05/23/2013; Accepted: 09/08/2013

### **Abstract**

Stilling basins are one of the most common structures for energy dissipation of flow with high velocities downstream hydraulic structures. Among these basins, diverging basins with rectangular and trapezoidal sections is an alternative choice of classical basin because of better hydraulic performance in order of sequent depth and relative energy loss and also no need to transition structure. The aim of this research is to investigate the effect of diverging walls of stilling basins on the structural costs and relative loss of energy in comparison with classical basins using results of physical model of hydraulic jump in diverging rectangular and trapezoidal basins with side slopes 1:0.5, 1:1 and 1:1.5, diverging angles of 3-9 degree and the Froude numbers of 2.6 and 9. The results showed that in case of diverging basins with rectangular sections, increase in divergence angle from 4-9 degree, causes increase in hydraulic jump efficiency about 10-29 percent and decrease in structural costs of about 4-20 percent. Additionally, the results of optimization model that was solved with Genetic Algorithm showed that in trapezoidal sections, for the Froude numbers lower than 4, diverging angle 3 and side slope 1:0.5 have the best performance. Comparison of results showed that with increasing side slope and divergence angle in the trapezoidal sections, the structural cost of basins increases because of increasing in the jump lengths.

**Keywords:** Diverging stilling basin, Jump efficiency, Structural costs, Genetic algorithm

---

\* Corresponding Author; Email: [esmaeili.varaki@yahoo.com](mailto:esmaeili.varaki@yahoo.com)