نشریه مهندسی عمران امیرکبیر

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۵۳ شماره ۳، سال ۱۴۰۰، صفحات ۹۲۱ تا ۹۳۴
DOI: 10.22060/ceej.2019.16694.6305

بررسی استهلاک انرژی ناشی از بکارگیری صفحات مشبک قائم در پایین دست شیب‌شکن های مایل با روش ترکیبی عصبی - فازی تطبیق پذیر

رضا نوروزی[۱]، رسول دانشفراز*[۲]، علی بازیار[۲]

۱- گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.
۲- گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران.

خلاصه: مطالعه حاضر با هدف بررسی استهلاک انرژی ناشی از بکارگیری صفحات مشبک به صورت قائم با دو نسبت تخلخل در پایین دست شیب شکن های مایل با سه زاویه متفاوت، دو ارتفاع شیب شکن و محدوده ی دبی ۲۰۰-۷۰۰ لیتر بر دقیقه با بررسی ۱۴۰ مدل آزمایشگاهی مختلف انجام شد. نتایج نشان داد که استفاده از صفحات مشبک منجر به افزایش حداقل ۴۰۷ و حداکثر ۹۰۳ درصدی راندمان استهلاک انرژی نسبی کل، نسبت به شیب شکن مایل ساده شد. روابطی برای تخمین استهلاک انرژی نسبی ناشی از بکارگیری صفحات مشبک قائم در پایین دست شیب شکن های مایل با معیارهای ارزیابی قابل قبول ارائه گردید. همچنین سهم هر کدام از سیستم های مستهلک کننده انرژی (سازه و جریان) ارائه شد. در ادامه از مدل های هوشمند، شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و عصبی - فازی تطبیق پذیر (ANFIS) برای تخمین استهلاک انرژی نسبی با استفاده از ۳ پارامتر P، θ و $\Delta z / y_c$ با استفاده از معیارهای ارزیابی مورد مقایسه قرار گرفت نتایج تحقیق نشان داد مدل عصبی - فازی تطبیق-پذیر با مقادیر R^2 و RMSE به ترتیب برابر با ۰/۹۹۶ و ۰/۰۰۶ نسبت به مقادیر مدل شبکه عصبی مصنوعی به ترتیب برابر ۰/۹۹۲ و ۰/۰۰۸ از قابلیت بالائی در تخمین استهلاک انرژی نسبی برخوردار می باشد.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۳۹۸/۰۴/۱۴
بازنگری: ۱۳۹۸/۰۶/ ۰۶
پذیرش: ۱۳۹۸/۰۶/ ۰۶
ارائه آنلاین: ۱۳۹۸/۰۶/۰۸

کلمات کلیدی:
استهلاک انرژی،
جریان زیر بحرانی،
شیب شکن مایل،
صفحات مشبک،
مدل های هوشمند.

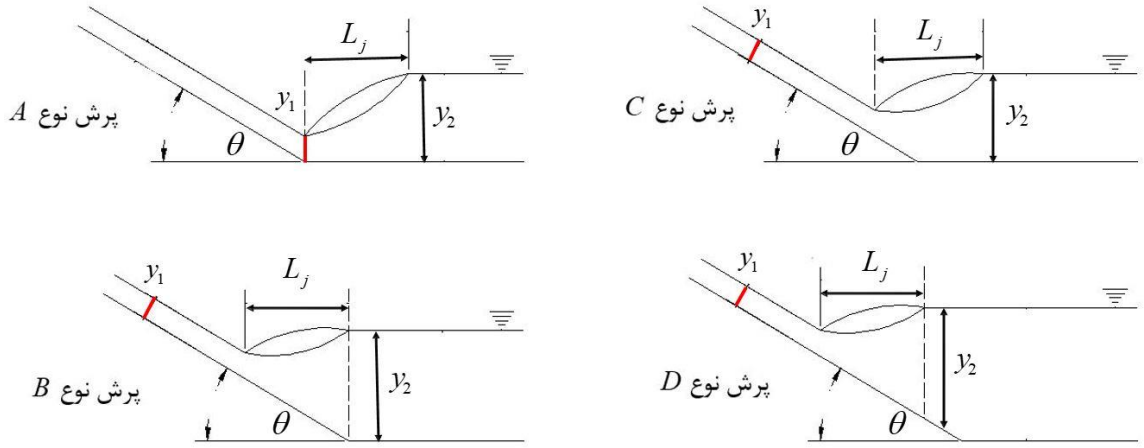
۱- مقدمه

از جمله سازه های مولد جریان فوق بحرانی در کانال های آبیاری و زهکشی شیب شکن ها بوده و باعث استهلاک انرژی کل جریان می شوند. شیب شکن ها انواع مختلفی دارند و می توانند به صورت قائم و مایل، با سازه الحاقی و بدون سازه الحاقی اجرا شوند، از آنجایی که در پایین دست شیب شکن ها انرژی جنبشی جریان افزایش می یابد، برای کاهش این انرژی از سازه های الحاقی استفاده می شود. استهلاک انرژی جنبشی مخرب در پایین دست شیب شکن های قائم با درنظر گرفتن تمهیداتی به صورت مطالعات تجربی توسط ایسن و همکاران [۱]، هانگ و همکاران [۲]، کبیری سامانی و همکاران [۳] و دانشفراز و همکاران [۴] بررسی شده است.

در مواردی که شیب طبیعی زمین به گونه ای باشد که استفاده از شیب شکن های قائم بدلیل محدودیت ارتفاعی مجاز نباشد، بکارگیری شیب شکن های مایل میتواند راهکار مناسبی برای تبدیل شیب تند زمین به شیب طراحی باشد. تا به حال تحقیقات اندک و بسیار محدودی بر روی شیب شکن های مایل صورت گرفته است. مطابق تقسیم بندی های کیندزواتر [۵] بسته به موقعیت پنجه پرش در سطح شیب شکن مایل یا تنداب و نیز موقعیت انتهای طول غلتاب نسبت به محل تقاطع شیب و قسمت افقی که وابسته به عمق پایاب است، چهار نوع پرش هیدرولیکی A، B، C و D تشکیل میگردد (شکل ۱).

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: daneshfaraz@yahoo.com

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.



شکل ۱. انواع پرش هیدرولیکی روی سطوح شیب‌دار

Fig. 1. Types of hydraulic jump on the inclined surfaces

واگنر [۶] با انجام مطالعه بر روی شیب شکن های مایل در رودخانه کلمبیا استهلاک انرژی در این سازه ها را بدست آورد. پیترکا [۷] نیز با انجام آزمایشاتی بر روی شیب شکن مایل دارای موانع، علاوه بر محاسبه استهلاک انرژی، ضوابط طراحی موانع را پیشنهاد نمود. اوتسا و یاسودا [۸] به بررسی مشخصات پرش هیدرولیکی نوع B و D، بر روی سطوح شیب دار با زوایای ۸ الی ۶۰ درجه پرداخته و معادلاتی برای نسبت اعماق مزدوج و طول پرش هیدرولیکی ارائه کردند. شولوچین و اکیب [۹] به بررسی آزمایشگاهی تأثیر عدد شیب شکن برای تخمین پرش هیدرولیکی در پایین دست شیب شکن قائم و مایل با سه زاویه و محدوده عمق بحرانی نسبی ۰/۱ تا ۰/۶ پرداختند. نتایج تحقیقات آنها نشان داد که عدد شیب شکن برای پیش بینی پرش هیدرولیکی در پایین دست شیب شکن های قائم مؤثر بوده ولی برای شیب شکن مایل کاربرد ندارد. مرادی سبزکوهی و همکاران [۱۰] با مقایسه سه نوع شیب شکن رایج قائم، مایل مستطیلی و پلکانی در دو ارتفاع، دو زاویه و دو عدد پله متفاوت، نشان دادند که به ترتیب بیشترین و کمترین استهلاک انرژی مربوط به شیب شکن قائم و مایل می باشد.

در سالهای اخیر ایجاد تلاطم و جریان دوفازی (تداخل آب با هوا) یکی از روش های مؤثر شناخته شده برای افزایش استهلاک انرژی جریان می باشد. صفحات مشبک از جمله سازه های مستهلک کننده انرژی شناخته شده است که به صورت قائم در مقابل جریان قرار می گیرد. صفحات مشبک با ایجاد تداخل آب و هوا، تحمیل پرش هیدرولیکی و تثبیت محل تشکیل آن در پایین دست سازه های مولد جریان فوق بحرانی، سبب کاهش انرژی جنبشی جریان می شوند. مطالعات در زمینه کاربرد صفحات مشبک انجام شده به شرح زیر می باشند:

راجاراتنام و هورتینگ [۱۱] برای اولین بار از صفحات مشبک به عنوان مستهلک کننده انرژی در پایین دست سازه های هیدرولیکی استفاده نمودند. چاکیر [۱۲] نشان داد که ضخامت صفحات مشبک تأثیری بر استهلاک انرژی جریان ندارد. بالکیش [۱۳] نیز تأثیر زاویه قرارگیری صفحات مشبک را بصورت آزمایشگاهی بر روی میزان استهلاک انرژی بررسی نموده و نشان داد که زاویه قرارگیری صفحات مشبک نیز تأثیر چندانی بر استهلاک انرژی ندارد. تأثیر آرایش چندتایی صفحات مشبک بر استهلاک انرژی جریان نیز توسط اصلانکارا [۱۴] به صورت آزمایشگاهی بررسی شد و نتایج نشان داد که چیدمان صفحات مشبک به صورت چندتایی سبب افزایش استهلاک انرژی می شود. مطابق مطالعات صادق فام و همکاران [۱۵] بکارگیری صفحات مشبک در پایین دست سازه های مولد جریان فوق بحرانی منجر به تشکیل سه نوع پرش هیدرولیکی آزاد، مستغرق و کاذب گردید. دانشفراز و همکاران [۱۶] به بررسی آزمایشگاهی تأثیر محل قرارگیری صفحات مشبک در میزان استهلاک انرژی پرداخته و نشان دادند که برای تمامی حالات استفاده از صفحات مشبک، میزان استهلاک انرژی ناشی از استفاده از این صفحات بیشتر از استهلاک انرژی نسبی ناشی از پرش آزاد می باشد. همچنین نشان دادند که با افزایش عدد فرود، بازده این صفحات در استهلاک انرژی کل افزایش یافته ولی سهم خود این صفحات در استهلاک انرژی کل کاسته می شود.

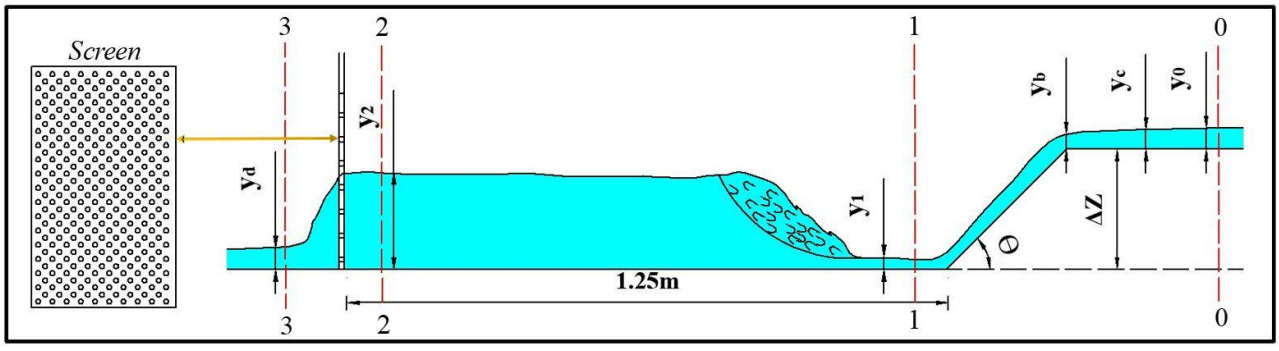
استهلاک انرژی ناشی از عوامل پرش هیدرولیکی، بلوک و صفحات مشبک نیز توسط دانشفراز و همکاران [۱۷] مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. بررسی استهلاک انرژی در این تحقیق نشان داد که در مدلهایی که در آنها بلوکهای مانع قبل از صفحات مشبک استفاده شده است، سبب افزایش استهلاک انرژی نسبت به مدلهای متناظر بدون بلوک می باشد. رضایی و همکاران [۱۸] با یک راهحل غیرسازه ای و دوستدار محیط زیست به بررسی آزمایشگاهی تأثیر رس و نانو رس مونت موریلونیتی بر کاهش آب شستگی در پایین دست صفحات مشبک قائم اقدام نموده و نتایج به دست آمده از این تحقیق نشان داد که استفاده از ترکیب رس و نانو رس مونت موریلونیتی تأثیری مثبت در کنترل آب شستگی دارد و در مواردی میتواند بسیار مفید باشد که از دیدگاه عملی نتوان با مصالحی نظیر بتن از بستر رودخانه محافظت کرد. نوروزی و همکاران [۱۹] به مطالعه مقایسه ای شبکه های عصبی مصنوعی و ماشین های بردار پشتیبان برای تخمین ضریب دبی سرریز کنگره ای پرداختند. در این مطالعه عملکرد شبکه های پرسپترون چند لایه (MLP)، شبکه های عصبی شعاعی (RBF) و ماشین های بردار پشتیبان (SVM) با تابع کرنل های مختلف در تخمین ضریب دبی سرریز کنگره ای مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که عملکرد مدل MLP با RMSE، R^2 و DC به ترتیب ۰/۰۱۹، ۰/۹۷۱ و ۰/۹۷۱ نسبت به سایر مدل ها قابل قبول تر و نزدیک تر به داده های آزمایشگاهی می باشد. صادق فام و همکاران [۲۰] به بررسی آزمایشگاهی آبشستگی جتهای جریان فوق بحرانی بالادست صفحات مشبک و ابعاد مدلسازی با استفاده از مدل هوشمند (AIMM) پرداختند. ابتدا با استفاده از داده های آزمایشگاهی مدلهای SFL وNF را اجرا گردید و سپس نتایج این مدلها به عنوان ورودی مدل SVM در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که SVM نتایج را بهبود میبخشد.

با توجه به تحقیقات پیشین در خصوص شیب شکن های مایل و ضرورت کاربرد این نوع سازه ها در کانالهای آبیاری و زهکشی برای تبدیل شیب تند زمین به شیب طراحی، یکی از معایب این سازه ها افزایش انرژی جنبشی در پایین دست می باشد. از آنجایی که صفحات مشبک به عنوان یک سازه مستهلک کننده انرژی با امکان ایجاد تلاطم با جریان دوفازی، تشکیل و تثبیت پرش هیدرولیکی میتواند در پایین دست شیب شکن مایل سبب افزایش استهلاک انرژی گردد، لذا مطالعه حاضر برای اولین بار جهت بررسی استهلاک انرژی در پایین دست شیب شکن های مایل با بکارگیری صفحات مشبک انجام شد و همچنین در ادامه از دو مدل هوشمند مدل شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و مدل عصبی فازی تطبیقپذیر (ANFIS) در تخمین استهلاک انرژی نسبی استفاده شد و نتایج آنها مورد مقایسه قرار گرفت. آزمایشات لازم در آزمایشگاه هیدرولیک بر روی ۱۴۰ مدل مختلف انجام و تعداد کل داده های تولید شده ۱۴۰ عدد می باشند.

۲- الگوسازی نظری یا تجربی

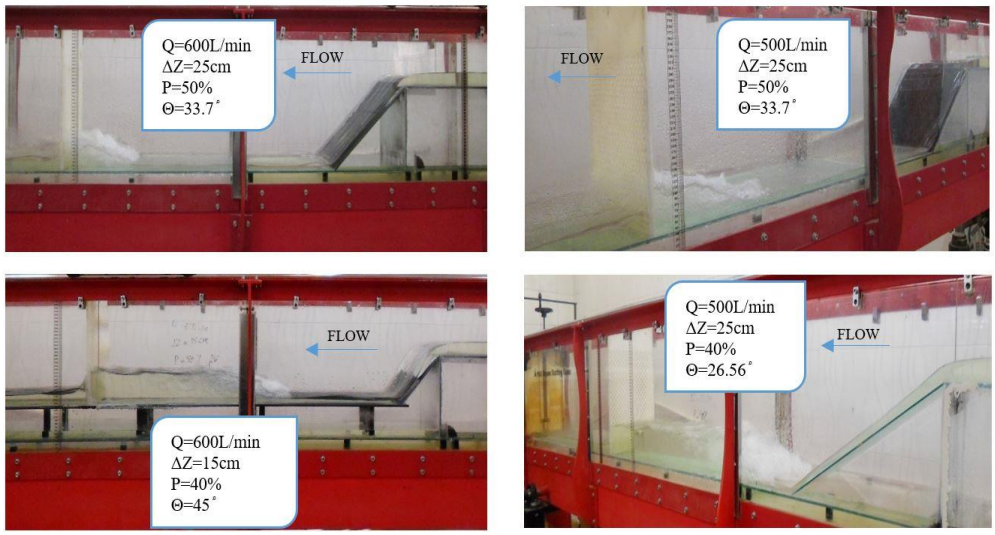
۲-۱- معرفی تجهیزات و مدل آزمایشگاهی

برای بررسی پارامترهای مؤثر، از مدل فیزیکی ساخته شده در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه مراغه بهره گرفته شده است. آزمایشهای مطالعه حاضر در فلومی به مقطع مستطیلی با شیب کف صفر به طول ۵، عرض ۰/۳ و ارتفاع ۰/۴۵ متر و دیواره و کف از جنس پلکسی گلس که این امر مشاهده دقیقتر و جزئیتر رفتارهای جریان را امکانپذیر مینماید، انجام شد. برای ایجاد سازه شیب شکن مایل با استفاده از باکسهای شیشهای هم عرض کانال، به طول ۱/۲ متر، با دو ارتفاع



شکل ۲. شماتیکی از مدل آزمایشگاهی

Fig. 2. Schematic of the laboratory model



شکل ۳. نمای شیب شکن مایل مجهز به صفحات مشبک قائم

Fig. 3. View of inclined drop equipped with vertical screens

۰/۱۵ و ۰/۲۵ متر و سه زاویه ۲۶/۵۶، ۳۳/۷ و ۴۵ درجه استفاده شد. ابعاد مدل با استفاده از ظوابط طراحی کفبندها و تثبیت کننده های بستر (ضابطه شماره ۷۰۱ صفحه ۱۱۹) زوایای شیب شکن ۲۶/۵۶ (m=۲)، ۳۳/۷ (m=۱,۵) و ۴۵ (m=۱) مایل انتخاب گردید. طبق ضابطه ۷۰۱، شیب کف قسمت مایل ۱ افقی به ۲ عمودی (m=۰,۵) و ملایم تر انتخاب می شود، ولی بهتر است m=۲ اختیار شود. در مطالعات (شولیکین و اکیب ۲۰۱۰) نیز شیب m=۱ مورد استفاده قرار گرفته است. صفحات مشبک از جنس پلی اتیلن، با روزنههای دایرهای شکل به صورت زیگزاگی و نسبت تخلخل های ۴۰ و۵۰ درصد تهیه شده و از آنجایی که مطابق مطالعات دانشفراز و همکاران [۱۶] فاصله قرارگیری صفحات مشبک از سازه مولد جریان فوقبحرانی بر میزان استهلاک انرژی در فاصله ۱/۲۵ متر عملکرد بهتری داشته است، لذا در تمامی مدلها فاصله صفحه مشبک از انتهای شیب مایل ۱/۲۵ متر درنظر گرفته شد. همچنین در تحقیقات پیشین صورت گرفته در زمینه صفحات مشبک نشان می دهد که این صفحات در تخلخل های ۴۰ و ۵۰ درصد بهترین عملکرد را در استهلاک انرژی کل جریان داشته اند (دانشفراز و همکاران ۲۰۱۹، دانشفراز و همکاران ۲۰۱۷، صادق فام و همکاران ۲۰۱۵، بالکیش ۲۰۰۴، چاکیر ۲۰۰۳، راجاراتنام و هورتینگ ۲۰۰۰). از طرفی تخلخل صفحات مشبک تعیین کننده تشکیل نوع پرش هیدرولیکی در پایین دست سازه مولد جریان فوق بحرانی می باشند. همچنین در تخلخل های کمتر از ۴۰ درصد صفحات مشبک می تواند حالت انسداد جریان رخ دهد و در تخلخل های بیشتر از ۵۰ درصد نیز میتواند از تأثیرات این صفحات در استهلاک انرژی جریان کاسته شود. لذا در تحقیق حاضر تخلخل های ۴۰ و ۵۰ درصد برای صفحات مشبک انتخاب گردید.

شکل ۲ شماتیکی از مدل آزمایشگاهی را نشان می دهد. جریان در بالادست شیب شکن زیر بحرانی درنظر گرفته شده و در هر سری از آزمایشها ابتدا پمپ روشن شده و سپس دبی جریان بوسیله روتامترهای نصب شده بر روی پمپ با خطای نسبی ۲± درصد تنظیم گردید. جریان ورودی توسط پمپ وارد مخزن بالادست شده و با عبور از آرامکننده جریان وارد فلوم می گردد. با استفاده از عمق سنج نقطهای با دقت ۱± میلیمتر در پنج نقطه از مقطع عرضی، عمق لبه شیب شکن، عمق بالادست شیب شکن، عمق اولیه پرش هیدرولیکی، عمق ثانویه پرش قبل از صفحه مشبک و عمق پایین دست صفحات مشبک اندازه گیری گردید و مقادیر متوسط آن به عنوان عمق نهایی درنظر گرفته شد. در مجموع ۱۴۰ آزمایش در محدوده عدد فرود ۵/۶ تا ۷/۲۶ انجام شده که ۳۶ آزمایش مربوط به شیب شکن مایل ساده و ۱۰۴ آزمایش برای شیب شکن مایل مجهز به صفحات مشبک قائم میباشد.

شکل ۳ نمایی از شیب شکن مایل مجهز به صفحه مشبک در آزمایشگاه را نشان می دهد. پس از انجام آزمایشها و اندازه گیریهای انجام شده محاسبات مربوط به استهلاک انرژی سیستم انجام گردید.

۲-۲- محاسبه استهلاک انرژی

یکی از اهداف مطالعه حاضر بررسی تأثیر استفاده از صفحات

مشبک قائم در شیب شکن های مایل بر میزان استهلاک انرژی کل بوده که به منظور رسیدن به این هدف نحوه محاسبه انرژی کل در هر مقطع از سیستم بیان می گردد. در بالادست شیب شکن مایل برای محاسبه انرژی کل از رابطه (۱) ارائه شده توسط بخمتف [۲۱] استفاده گردید.

$$E_0 = \Delta Z + 1.5 y_c \quad (۱)$$

پارامترهای E_0، Δz و y_c در رابطه (۱) به ترتیب بیانگر انرژی کل در بالادست شیب شکن مایل، ارتفاع شیب شکن و عمق بحرانی در بالادست شیب شکن می باشند.

برای محاسبه انرژی قبل و بعد از پرش هیدرولیکی و در پایین دست صفحات مشبک قائم از رابطه (۲) استفاده شد.

$$E_n = y_n + \frac{q^2}{2gy_n^2} \quad (۲)$$

که در آن E_n، y_n، q و g به ترتیب انرژی کل در مقطع n ام، عمق جریان در مقطع n ام، دبی در واحد عرض و شتاب گرانش زمین می باشند. با بدست آوردن انرژی کل در بالادست شیب شکن مایل و مقطع n ام میتوان برای محاسبه درصد استهلاک انرژی نسبی بین دو مقطع n، ۰ از رابطه (۳) استفاده کرد.

$$\frac{\Delta E}{E_0} = \left(\frac{E_0 - E_n}{E_0}\right) \times 100 \quad (۳)$$

در رابطه (۳): $\Delta E/E_0$ استهلاک انرژی نسبی جریان می باشد. راندمان استهلاک انرژی نسبی نیز از رابطه (۴) حاصل گردید.

$$\eta = \left(\frac{\Delta E_s}{\Delta E_p} - 1\right) \quad (۴)$$

که در آن η، ΔE_s و ΔE_p به ترتیب راندمان استهلاک انرژی نسبی، استهلاک انرژی نسبی در شیب شکن مایل مجهز به صفحات مشبک قائم و استهلاک انرژی نسبی در شیب شکن مایل ساده می باشد.

۲-۳- شبکه عصبی مصنوعی (ANN)

شبکه عصبی مصنوعی از تعدادی نرون تشکیل شده اند که به صورت لایه ای در کنار یکدیگر قرار گرفته اند. هر شبکه مصنوعی از لایه های ورودی، مخفی و خروجی تشکیل شده است که شبکه ورودی برای تهیه داده ها می باشد. لایه خروجی شامل مقادیر پیش بینی شده بوسیله شبکه عصبی بوده و لایه مخفی یا میانی از نودهای پردازشگر تشکیل شده است. انتخاب نوع و تعداد ورودی های شبکه در کیفیت عملکرد شبکه تأثیر زیادی دارد و لایه های پنهان نقش سازمان دهی عملکرد یک شبکه ی عصبی را دارند [۱۹].

شبکه پرسپترون چند لایه (MLP) رایج ترین مدل شبکه عصبی استفاده شده در مسائل علوم آب می باشد که برای آموزش این شبکه از الگوریتم پس انتشار خطا که یک روش یادگیری با ناظر است استفاده می شود. منظور از آموزش یک شبکه عصبی، تنظیم پارامترهای شبکه (وزنها و بایاسها) با ارائه الگو های آموزش است؛ بطوری که با ارائه مجدد همان الگوها خطای حاصل بین پاسخ مطلوب و شبکه حداقل گردد.

به طور کلی در شبکه پرسپترون چند لایه عموما دو نوع سیگنال، یعنی سیگنال هایی که در مسیر رفت (از لایه ورودی به طرف لایه خروجی حرکت می کنند) و دیگری سیگنال های برگشت (از لایه خروجی به طرف لایه ورودی حرکت می کنند)، استفاده می شود که به ترتیب به نام سیگنال تابعی و خطا معروف هستند. تنظیم پارامترها در شبکه پرسپترون چند لایه توسط سیگنال خطا و سیگنال ورودی صورت می گیرد. تعیین تعداد لایه ها و نرون های موجود در آنها از مهمترین مسائل در مدل سازی با شبکه عصبی مصنوعی است. توکار و جانسون رایجترین توابع محرک استفاده شده در شبکه های انتشار برگشتی را توابع محرک سیگموئید و تانژانت هیپربولیک ذکر کردند [۲۲].

۲-۴- عصبی فازی تطبیق پذیر (ANFIS)

در سالهای اخیر از ترکیب شبکه های عصبی مصنوعی با منطق فازی، سیستم های عصبی- فازی تطبیق پذیر به وجود آمده اند. یک شبکه تطبیقی، یک ساختار پیشرو چندلایه است که رفتار کلی خروجی آن به وسیله مقدار یک مجموعه از پارامترهای قابل اصلاح تعیین میگردد. به عبارت دیگر ساختار شبکه تطبیقی شامل یک مجموعه از گره های متصل به هم است که به طور مستقیم به هم مرتبط شده اند و در آن هر گره یک واحد پردازش محسوب می شود.

این سیستم ها مشکل اصلی در طراحی سیستم های فازی (به دست آوردن قواعد اگر- آنگاه در سیستم فازی) را به وسیله استفاده مؤثر از قابلیت یادگیری ANN جهت تولید خودکار این قواعد و بهینه سازی پارامترها، حل کرده اند که دو قانون این سیستم نیز بـه صـورت

روابـط (۵) و (۶) قابل بیان هستند:

$$If\ \ x\ is\ A_1\ \&\ y is\ B_1\ \&\ z\ is C_1 \quad Then\ f\ = p_1x\ +\ q_1y\ +\ k_1z\ +\ r_1 \tag{۵}$$

$$If\ \ x\ is\ A_2\ \&\ y is\ B_2\ \&\ z\ is C_2 \quad Then\ f\ = p_2x\ +\ q_2y\ +\ k_2z\ +\ r_2 \tag{۶}$$

در ANFIS لازم است که در لایه اول نوع تابع عضویت و تعداد آن مشخص شود. برای این منظور در لایه اول، دو روش تفکیک شبکه ای و تفکیک خوشه ای جهت کلاسه بندی داده ها وجود دارد. انواع توابع موجود در این شبکه شامل مثلثی[1]، گوسی[2]، گوسی نوع دو[3]، ذوزنقه ای[4] می باشد [۲۳]. همچنین دو نوع سیستم استنتاج فازی برای نگاشت ورودی به خروجی وجود دارد که شامل مدل فازی سوگنو[5] و ممدانی[6] است. مدل استنتاج فازی ممدانی، به صورت اصول فازی با خروجی برخورد می کند. بدین مفهوم که تابع عضویت خروجی نیز مجموعه فازی است [۲۴]. در سیستم های فازی سوگنو توابع عضویت خروجی خطی و ثابت است. به بیان ساده در روش سوگنو، غی فازی کردن خروجی به دلیل خطی و ثابت بودن با روش های محدودی امکانپذیر است [۲۵]، لذا در این مطالعه از سیستم استنتاج فازی ممدانی و تابع مثلثی استفاده شد.

در تحقیق حاضر جهت شبیه سازی از نرمافزار استاتیستیکا برای مدل شبکه عصبی و از نرمافزار متلب برای مدل عصبی – فازی تطبیق پذیر استفاده گردید.

در این تحقیق از دو مدل هوشمند مدل شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و مدل عصبی– فازی تطبیق پذیر (ANFIS) در تخمین استهلاک انرژی نسبی ($\Delta E/E_0$) با استفاده از ۳ پارامتر θ، P و $y_c/\Delta z$ استفاده شده است. که داده های موجود در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه مراغه برداشت شده است و تعداد کل داده های تولید شده ۱۴۰ عدد می باشد. در مدل شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و مدل عصبی– فازی تطبیق پذیر (ANFIS) پارامترهای θ، P و $y_c/\Delta z$ به عنوان ورودی و پارامتر بیبعد $\Delta E/E_0$ یعنی استهلاک انرژی نسبی در پایین دست شیب شکن های مایل با بکارگیری صفحات مشبک به عنوان خروجی معرفی گردید. در هر دو مدل ۷۰ درصد کل داده های موجود برای دوره آموزش و ۳۰ درصد آنها نیز برای دوره آزمون مورد استفاده قرار گرفته است.

۲-۵- معیارهای ارزیابی دقت

برای ارزیابی، توانایی و دقت عملکرد مدل های شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و مدل عصبی– فازی تطبیق پذیر (ANFIS) در تخمین استهلاک انرژی نسبی، از دو شاخص آماری استفاده شده است. معیارهای ارزیابی جهت تخمین پارامتر استهلاک انرژی نسبی در پایین دست شیب شکن های مایل با بکارگیری صفحات مشبک ($\Delta E/E_0$)، شامل ضریب تعیین (R^2) و خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) می باشند که هر کدام از آنها به ترتیب از روابط (۷) و (۸) محاسبه می گردند.

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^{n}\left(O_i-\bar{O}\right)\left(P_i-\bar{P}\right)\right]^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(O_i-\bar{O}\right)^2\sum_{i=1}^{n}\left(P_i-\bar{P}\right)^2} \tag{۷}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(P_i-O_i\right)^2}{n}} \tag{۸}$$

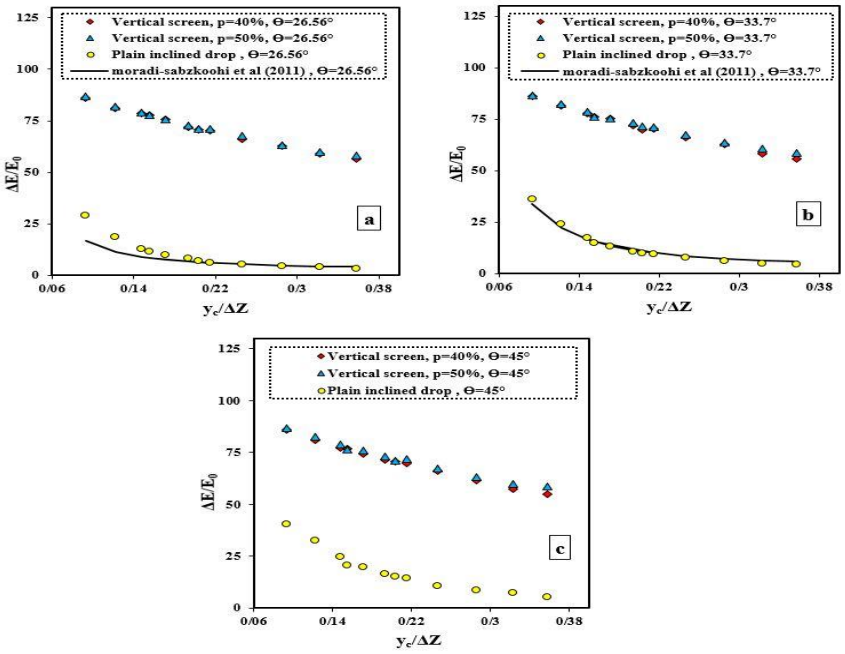
در این روابط O_i مقادیر حاصل از مقادیر مشاهداتی (استخراجی از آزمایشگاه)، p_i مقادیر حاصل از روش مدل های پیش بینی کننده، $\bar{O}$ میانگین مقادیر حاصل از مقدار مشاهداتی، $\bar{P}$ میانگین مقادیر حاصل از مدل های پیش بینی کننده و n تعداد داده ها می باشد.

۲-۶- آنالیز ابعادی

پارامترهای هندسی و هیدرولیکی مؤثر بر استهلاک انرژی شیب شکن مایل مجهز به صفحات مشبک قائم در رابطه (۹) آورده شده است.

$$\Delta E = f_1(\mu,\rho,g,q,\Delta Z,\theta,t, p,E_0,y_0,y_c,y_b,y_1,y_2,y_d) \tag{۹}$$

1 Trimf
2 Gaussmf
3 Gauss2mf
4 Trapmf
5 Sugeno Fuzzy Model
6 Mamdani Fuzzy Model



شکل ۴. تغییرات استهلاک انرژی نسبی در مقابل عمق بحرانی نسبی برای شیب شکن مایل ساده و مجهز به صفحات با نسبت تخلخل مختلف

$\theta = 45^{\circ}$ (c $\theta = 33.7^{\circ}$ (b $\theta = 26.56^{\circ}$ (a

Fig. 4. Relative energy dissipation variations versus relative critical depth for plain inclined drop equipped with screens with different porosity ratio

$\theta = 45^{\circ}$ (c $\theta = 33.7^{\circ}$ (b $\theta = 26.56^{\circ}$ (a

که در آن، ΔE استهلاک انرژی کل ($\Delta E = E_0 - E_d$ [L]، E_0 انرژی کل در بالادست شیب شکن ($E_0 = \Delta Z + 1.5 y_c$ [L])، E_d انرژی کل در پایین دست شیب شکن [L]، μ لزجت دینامیکی [$ML^{-1}T^{-1}$]، ρ جرم مخصوص آب [ML^{-3}]، g شتاب گرانش زمین [LT^{-2}]، q دبی واحد عرض [L^2T^{-1}]، ΔZ ارتفاع شیب شکن [L]، θ زاویه شیب شیب شکن [$-$]، t ضخامت صفحات مشبک [L]، p نسبت تخلخل صفحه مشبک [$-$]، y_0 عمق بالادست شیب شکن [L]، y_c عمق بحرانی [L]، y_b عمق لبه شیب شکن [L]، y_1 عمق اولیه پرش هیدرولیکی [L]، y_2 عمق قبل از صفحه مشبک [L] و y_d عمق پایین دست صفحه مشبک [L] میباشند. با استفاده از روش پی باکینگهام و با درنظر گرفتن ρ، g و y_0 به عنوان متغیرهای تکراری تحلیل ابعادی انجام و کمیت هیدرولیکی وابسته استهلاک انرژی نسبی بر اساس پارامترهای مستقل بی بعد طبق رابطه (۱۰) استخراج گردید:

$$\frac{\Delta E}{E_0} = f_2(\mathrm{Re}_0, Fr_0, \frac{\Delta Z}{y_0}, \theta, p, \frac{t}{y_0}, \frac{E_0}{y_0}, \frac{y_c}{y_0}, \frac{y_b}{y_0}, \frac{y_1}{y_0}, \frac{y_2}{y_0}, \frac{y_d}{y_0}) \quad (۱۰)$$

با ساده سازی پارامترهای بی بعد، رابطه (۱۰) به صورت زیر خلاصه گردید:

$$\frac{\Delta E}{E_0} = f_3(\mathrm{Re}_0, Fr_0, \theta, p, \frac{t}{\Delta Z}, \frac{E_0}{\Delta Z}, \frac{y_c}{\Delta Z}, \frac{y_b}{y_c}, \frac{y_2}{y_1}, \frac{y_d}{\Delta Z}) \quad (۱۱)$$

با توجه به اینکه در تمامی مدلها جریان کاملا متلاطم بوده و محدوده عدد رینولد مابین ۵۳۰۷۸/۵۶-۹۱۸۶۳/۵۲ میباشد، میتوان از Re_0 صرفنظر نمود [۲۶]. همچنین از آنجایی که جریان در بالادست شیب شکن زیربحرانی بوده و $0.68 < Fr_0 < 0.80$ میباشد، از تأثیر عدد فرود بالادست نیز صرفنظر شد [۳]. از پارامتر ضخامت صفحات مشبک نیز به دلیل بی تأثیر بودن در استهلاک انرژی صرف نظر گردید [۱۳]. در مطالعه حاضر مشخصات پرش هیدرولیکی مد نظر نبوده به همین دلیل از پارامتر (y_2/y_1) صرف نظر میشود. همچنین به دلیل اینکه در استهلاک انرژی نسبی، انرژی در بالادست شیب شکن بررسی میگردد؛ لذا میتوان از پارامتر ($E_0/\Delta z$) نیز صرفنظر کرد. در نتیجه پارامتر وابسته استهلاک انرژی نسبی را می توان تابعی از

جدول ۱. راندمان استهلاک انرژی نسبی کل ( ) شیب شکن مایل مجهز به صفحات مشبک قائم نسبت به شیب شکن مایل ساده

Table 1. Total relative energy dissipation efficiency of inclined drop equipped with vertical screen versus to plain inclined drop

درصد تخلخل صفحه مشبک	زاویه شیب‌شکن مایل		
	$\theta = 26.6°$	$\theta = 33.7°$	$\theta = 45°$
	راندمان استهلاک انرژی نسبی (٪)		
P=40%	۸۸۹/۸۰	۶۱۹/۲۴	۴۰۷/۸۹
P=50%	۹۰۳/۶۰	۶۳۶/۶۴	۴۲۳/۳۲

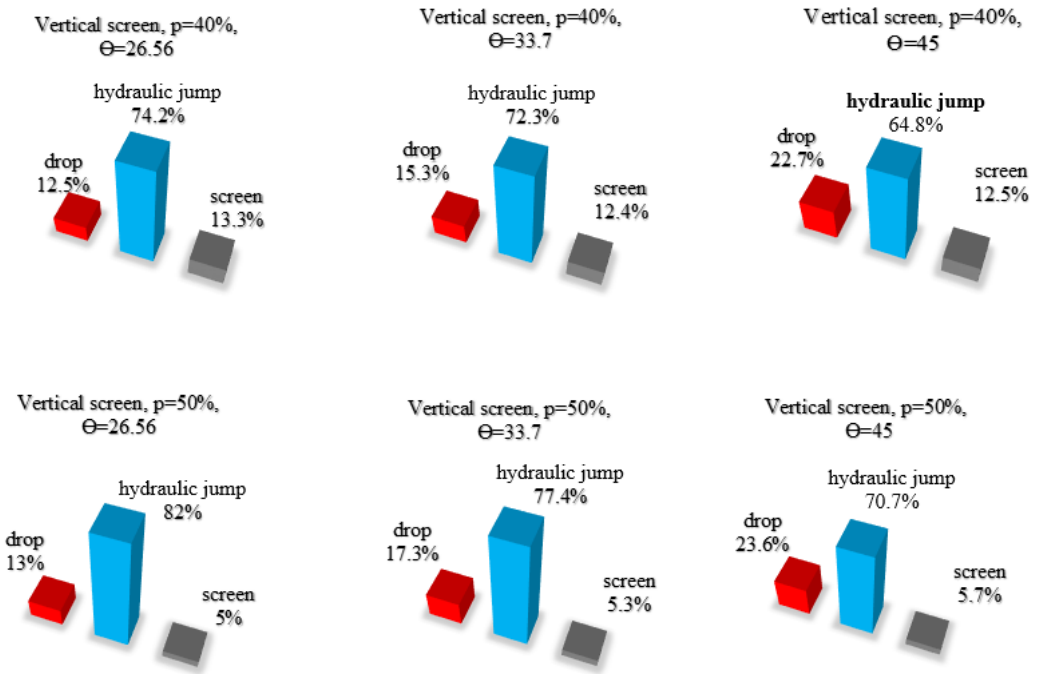
پارامترهای مستقل(θ، P و $\Delta z / y_c$) بیان نمود.

$$\frac{\Delta E}{E_0} = f_4(\theta, p, \frac{y_c}{\Delta z}) \qquad (۱۲)$$

که در آن $\Delta z / y_c$ عمق بحرانی نسبی، θ زاویه شیب شیب شکن و p نسبت تخلخل صفحه مشبک می باشد.

۳- نتایج و بحث

تغییرات استهلاک انرژی نسبی براساس آنالیز ابعادی، برای شیب شکن مایل ساده و مجهز به صفحات مشبک قائم مطالعه حاضر با سه زاویه و دو نسبت تخلخل ۴۰ و ۵۰ درصد، بستگی به عمق بحرانی نسبی دارد. لذا در شکل های a-۴ تا c-۴ نتایج محاسبه استهلاک انرژی نسبی مطالعه حاضر با نتایج مطالعه مرادی سبزکوهی



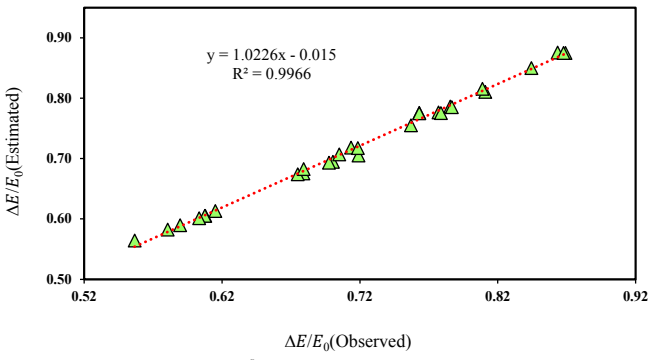
شکل ۵. درصد تغییرات استهلاک انرژی برای سیستم های مستهلک کننده انرژی در زوایا و نسبت تخلخل مختلف

Fig. 5. Percentage of energy dissipation changes for different energy dissipater systems at different angles and porosity ratios

و همکاران [۱۰] برای شیب شکن مایل ساده در دو زاویه ۲۶/۵۶ و ۳۳/۷ درجه نسبت به عمق بحرانی نسبی مقایسه شده است. مطابق شکل، در تمامی داده های مربوط به مطالعه حاضر و مرادی سبزکوهی و همکاران [۱۰] با افزایش عمق بحرانی نسبی، استهلاک انرژی نسبی کل کاهش مییابد. ملاحظه می شود که شیب شکن مایل ساده مطالعه حاضر در دو زاویه ۲۶/۵۶ و ۳۳/۷ درجه با تحقیقات مرادی سبزکوهی و همکاران [۱۰] مطابقت و همپوشانی نزدیکی دارد.

همچنین در یک دبی ثابت (عمق بحرانی نسبی ثابت) با افزایش ارتفاع شیب شکن و افزایش شیب، استهلاک انرژی افزایش نیز می یابد. با مقایسه شیب شکن مایل مجهز به صفحات مشبک قائم و شیب شکن مایل ساده مطالعه حاضر نیز می توان دریافت که حضور صفحات مشبک باعث افزایش چشمگیر استهلاک انرژی در هر سه زاویه شیب شده است. برای هر سه زاویه شیب شکن مایل نیز با مقایسه درصد تخلخل صفحات مشبک چنین استنباط می شود که در اعماق بحرانی نسبی کمتر، استهلاک انرژی برای هر دو نسبت تخلخل دارای مقادیر نزدیک به هم می باشد. با افزایش عمق بحرانی نسبی نیز تأثیر صفحه مشبک با تخلخل ۵۰ درصد در استهلاک انرژی نسبی کل بیشتر به چشم می خورد.

از آنجایی که در پشت صفحه مشبک ۵۰ درصد بدلیل نوع پرش هیدرولیکی تشکیل یافته، تلاطم جریان زیاد بوده و عمق پایین دست آن نیز بیشتر از تخلخل ۴۰ درصدی است، لذا صفحه مشبک ۵۰ درصد دارای استهلاک انرژی نسبی کل بیشتری نسبت به تخلخل ۴۰



شکل ۶. مقایسه نمودار پراکندگی داده ها برای دوره آزمون مدل (ANFIS)

Fig. 6. Comparison of data scattering diagram for model test period (ANFIS)

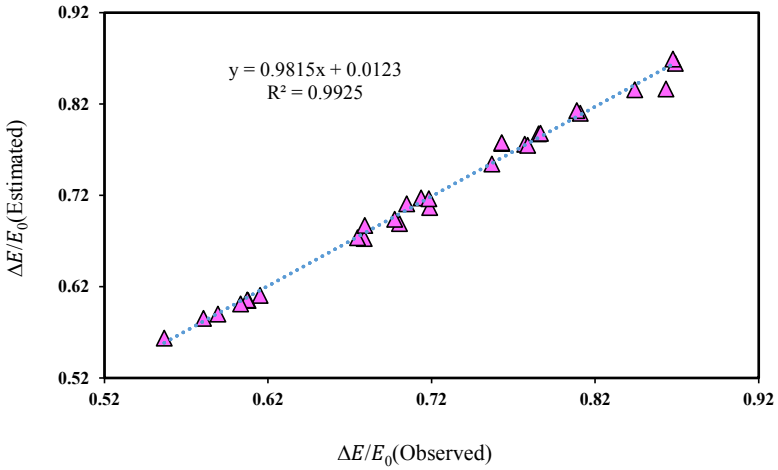
درصد می باشد. متوسط استهلاک انرژی نسبی کل شیب شکن مایل ساده برای تمامی مقادیر عمق بحرانی نسبی در زوایای ۲۶/۵۶، ۳۳/۷ و ۴۵ درجه، به ترتیب ۹، ۱۳ و ۱۷ درصد می باشد، که با افزایش زاویه ملاحظه می شود، استهلاک انرژی نسبی کل افزایش یافته و با نتایج مطالعات مرادی سبزکوهی و همکاران [۱۰] نیز همخوانی دارد.

همچنین در شیب شکن مایل مجهز به صفحات مشبک برای زوایای ذکر شده در نسبت تخلخل ۴۰ درصد متوسط استهلاک انرژی نسبی کل به ترتیب ۷۱/۲، ۷۰/۹ و ۷۰/۵ درصد بوده و در صفحات مشبک ۵۰ درصد نیز این مقادیر به ترتیب ۷۲، ۷۲/۱ و ۷۲ درصد می باشند. متوسط استهلاک انرژی نسبی کل بیان شده در هر دو تخلخل برای یک زاویه ثابت، نشان می دهد که تخلخل ۵۰ درصد نسبت به تخلخل ۴۰ درصدی استهلاک انرژی نسبی کل بیشتری دارد. در یک تخلخل

جدول ۲. محدوده پارامترها برای داده های ورودی و خروجی در دوره آموزش و آزمون

Table 2. Parameter range for input and output data during training and testing period

	داده‌های آزمون				داده‌های آموزش			
	ΔE/E0	yc/Δz	p	θ	ΔE/E0	yc/Δz	p	θ
حداقل	۰/۴۶۳	۰/۰۹۳	۰/۴	۰	۰/۵۴۷	۰/۰۹۳	۰/۴	۰/۴۶۳
حداکثر	۰/۷۸۵	۰/۳۵۷	۰/۵	۱	۰/۸۶۱	۰/۳۵۷	۰/۵	۰/۷۸۵
میانگین	۰/۶۰۶	۰/۱۹۷	۰/۴۵۸	۰/۳۳۲	۰/۷	۰/۲۲	۰/۴۵	۰/۶۲
انحراف معیار	۰/۱۳	۰/۰۷۹	۰/۰۴۹	۰/۳۰۶	۰/۰۸	۰/۰۸	۰/۰۵	۰/۱۳
ضریب تغییرات	۰/۲۱۵	۰/۴۰۰	۰/۱۰۷	۰/۹۲۱	۰/۱۱۷	۰/۳۴۳	۰/۱۱۱	۰/۲۱۶



شکل ۷. مقایسه نمودار پراکندگی داده ها برای دوره آزمون مدل (ANN)

Fig. 7. Comparison of data scattering diagram for model test period (ANN)

ثابت نیز، با مقایسه متوسط استهلاک انرژی نسبی کل در هر زاویه استنباط میشود که زاویه تأثیر چندانی در استهلاک انرژی نسبی کل ندارد.

مطابق رابطه (۴)، راندمان استهلاک انرژی نسبی کل شیب شکن مایل مجهز به صفحات مشبک قائم نسبت به شیب شکن مایل ساده برای تمامی مقادیر نسبی عمق بحرانی و زاویه محاسبه شده و متوسط آنها در جدول ۱ ارائه شده است.

با توجه به جدول فوق مشاهده میشود که در هر سه زاویه صفحات مشبک با تخلخل ۵۰ درصد راندمان استهلاک انرژی نسبی کل بیشتری نسبت به صفحات مشبک با تخلخل ۴۰ درصدی دارند.

رابطه غیرخطی (۱۳) و (۱۴) با در نظر گرفتن داده های آزمایشگاهی برای محاسبه استهلاک انرژی در پایین دست شیب شکن های مایل مجهز به صفحات مشبک قائم و شیب شکن های مایل ساده ارائه شده است. در رابطه (۱۴) از ضرب روابط بی بعد استفاده و پارامتر تخلخل صفحات مشبک به دلیل تأثیر کم آن صرف نظر شده است.

$$\frac{\Delta E}{E_0} = -1.052\left(\frac{y_c}{\Delta Z}\right)^{0.429} \times 0.352(\theta)^{0.205} \times 0.943(p)^{-0.005} + 1.201 \quad (۱۳)$$

$$\frac{\Delta E}{E_0} = 0.01596\left(\frac{y_c}{\Delta Z}\right)^{-1.4869} \times (\theta)^{0.9037} + 1.24 \quad (۱۴)$$

با توجه به این که صفحات مشبک باعث تشکیل پرش هیدرولیکی در پایین دست شیب شکن های مایل میشوند، لذا سازه شیب شکن، پرش هیدرولیکی و صفحه مشبک سهم جداگانهای در مستهلک شدن انرژی دارند. از این رو با استفاده از رابطه (۱۵)، سهم هر یک از مستهلک کنندههای انرژی برای هر عمق بحرانی نسبی محاسبه شده و مقادیر متوسط آن در شکل ۵ نشان داده شده است.

$$\lambda = \frac{E_{n-1} - E_n}{E_u - E_d} \quad (۱۵)$$

که در رابطه فوق λ ، E_{n-1}، E_n، E_u و E_d به ترتیب سهم مستهلک کننده انرژی، انرژی در مقطع n-۱، انرژی در مقطع n ام، انرژی در بالادست شیب شکن مایل و انرژی در پایین دست صفحات مشبک می باشد.

همان طور که در شکل ۵ مشاهده میگردد، با افزایش زاویه، در شیب شکن مایل مجهز به صفحه مشبک قائم در هر دو نسبت تخلخل، سهم استهلاک انرژی سازه شیب شکن افزایش می یابد. از طرفی با توجه به این که در نسبت تخلخل ۵۰ درصد کلیه پرشهای تشکیل یافته از نوع پرش A بوده و با افزایش ارتفاع شیب شکن، پرش تشکیل یافته در پشت صفحه مشبک از نوع پرش کاذب میگردد، به همین دلیل نسبت به صفحه مشبک ۴۰ درصدی، سهم پرش هیدرولیکی و سازه شیب شکن در استهلاک انرژی آن افزایش یافته و سهم صفحه مشبک کاهش می یابد. همچنین در نسبت تخلخل ۴۰ درصدی صفحه مشبک از آنجایی که ابتدا پرش نوع A تشکیل میبابد

و با افزایش عمق بحرانی نسبی پرش نوع B تشکیل میگردد، بر همین اساس در این نوع صفحه مشبک سهم پرش و سازه شیب شکن کمتر از صفحه مشبک ۵۰ درصد بوده و سهم صفحه مشبک در استهلاک انرژی بیشتر از صفحه مشبک ۵۰ درصد میباشد.

در جدول ۲ پارامترهای آماری مجموعه دادهها برای دوره آموزش و آزمون نشان داده شده است.

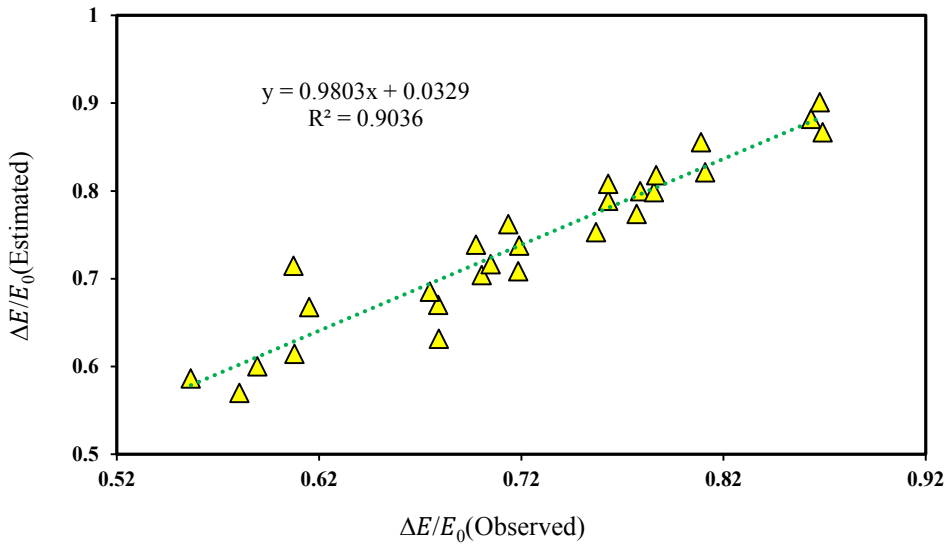
تابع تانژانت هیپربولیک متداول ترین شکل از توابع محرک شبکه پرسپترون چندلایه است، که در این تحقیق از آن برای ساخت لایه خروجی شبکههای عصبی مصنوعی استفاده گردید. آموزش شبکه های پرسپترون چند لایه با استفاده از الگوریتم آموزش پس انتشار خطا بنام الگوریتم لونبرگ مارکوارت به دلیل همگرایی سریع تر در آموزش شبکه، استفاده شد. جهت مدل سازی ($\Delta E/E_0$)، شبکه ی عصبی دارای ۳ نرون در لایه ورودی (θ، P و $y_c/\Delta z$) و یک نرون در لایه خروجی($\Delta E/E_0$)، مدل های مختلفی مورد ارزیابی قرار گرفتند که در نهایت ۴ نرون در لایه پنهان با مقادیر R^2 و RMSE به ترتیب برابر ۰/۹۹۲ و ۰/۰۰۸ از قابلیت بالائی در تخمین استهلاک انرژی نسبی به دست آمد.

در شکلهای ۶، ۷ و ۸ پراکندگی داده ها برای دوره آزمون به ترتیب با استفاده از مدل عصبی– فازی تطبیق پذیر (ANFIS)، مدل شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و معادله (۱۳) نشان داده شده است. با توجه به شکلهای ۶، ۷ و ۸ مشاهده میگردد که بیشتر نقاط بر روی یا نزدیکی خط نیمساز قرار گرفته اند که این مقبولیت هر دو مدل و معادله (۱۳) در تخمین مقدار($\Delta E/E_0$) را نشان میدهد ولی مدل عصبی– فازی تطبیق پذیر (ANFIS) نتایج بسیار نزدیکی را نسبت به مقادیر مشاهداتی(آزمایشگاهی) تخمین زده است و بنابراین از دقت بسیار بالایی در تخمین پارامتر مورد نظر یعنی مقدار ($\Delta E/E_0$) برخوردار است.

معیارهای آماری نشان می دهند که مدل عصبی– فازی تطبیق پذیر (ANFIS) نسبت به روش شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و معادله حاصل از داده های آزمایشگاهی از دقت بالایی برخوردار می باشد. همانطور مشاهده می گردد، مدل عصبی– فازی تطبیق پذیر (ANFIS) نتایج بسیار مشابهی نسبت به مقادیر آزمایشگاهی در پیش بینی مقدار استهلاک انرژی نسبی در پایین دست شیب شکن های مایل با بکارگیری صفحات مشبک را ارائه داده است (جدول ۳).

۴- نتیجه گیری

در مطالعه حاضر به بررسی آزمایشگاهی استهلاک انرژی در پایین دست شیب شکن های مایل با بکارگیری صفحات مشبک پرداخته



شکل ۸. مقایسه نمودار پراکندگی داده ها برای دوره آزمون معادله ۱۳

Fig. 8. Comparison of data scattering diagram for model test period (Eq. (13))

جدول ۳. نتایج مدلANFIS ، ANN و معادله ۱۳ برای دوره آموزش و آزمون

Table 3. Results of ANN, ANFIS and equation 13 for training and test period

	داده‌های آزمون		داده‌های آموزش	
	R^2	RMSE	R^2	RMSE
ANN	۰/۹۹۲۵	۰/۰۰۸	۰/۹۸۹	۰/۰۰۸۴
ANFIS	۰/۹۹۶۶	۰/۰۰۶	۰/۹۹۱	۰/۰۰۶۹
Equ. 13	۰/۹۰۳۶	۰/۱۹۵	۰/۸۹۳	۰/۲۰۳

شد. برای این منظور از دو ارتفاع ۰/۱۵ و ۰/۲۵ متر و سه زاویه ۲۶/۵۶، ۳۳/۷ و ۴۵ درجه برای شیب شکن و دو نسبت تخلخل ۴۰ و ۵۰ درصد برای صفحه مشبک استفاده شده است. در مجموع ۱۴۰ آزمایش در محدوده دبی ۲۰۰-۷۰۰ لیتر بر دقیقه در آزمایشگاه اجرا شد.

براساس نتایج آزمایشگاهی بدست آمده، در یک دبی ثابت با افزایش ارتفاع شیب شکن و افزایش زاویه سطح شیبدار، استهلاک انرژی افزایش می یابد. همچنین با مقایسه شیب شکن مایل مجهز به صفحات مشبک قائم و شیب شکن مایل ساده مطالعه حاضر نیز میتوان دریافت که حضور صفحات مشبک باعث افزایش چشمگیر استهلاک انرژی در هر سه زاویه شیب شکن مایل شده است. صفحات مشبک استفاده شده در شیب شکن های مایل استهلاک انرژی کل جریان را نسبت به شیب شکن مایل ساده در نسبت تخلخل ۴۰ درصد برای زاویه های ۲۶/۵۶، ۳۳/۷ و ۴۵ درجه به ترتیب ۹/۸۹، ۷/۱۹ و ۵/۰۷ برابر افزایش داد. همچنین در نسبت تخلخل ۵۰ درصد برای زاویه های آورده شده به ترتیب ۱۰/۰۳، ۷/۳۶ و ۵/۲۳ برابر افزایش میدهد. با افزایش ارتفاع شیب شکن مایل مجهز به صفحات مشبک قائم در تخلخل ۵۰ درصدی نسبت به تخلخل ۴۰ درصدی، سهم استهلاک انرژی شیب شکن و پرش هیدرولیکی افزایش و سهم صفحه مشبک کاهش می یابد.

و در ادامه از دو مدل هوشمند مدل شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و مدل عصبی- فازی تطبیقپذیر (ANFIS) در تخمین استهلاک انرژی نسبی ($\Delta E/E_0$) با استفاده از ۳ پارامتر θ، P و Δz /y_c استفاده شده است. سپس مقادیر تخمینی ($\Delta E/E$) با مدل های مذکور با استفاده از معیارهای ارزیابی مورد مقایسه قرار گرفت.

نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد که هر دو مدل هوشمند از دقت بهتری در تخمین ($\Delta E/E_0$) برخوردار میباشند. ولی مدل عصبی- فازی تطبیق پذیر (ANFIS) نسبت به شبکه عصبی مصنوعی (ANN) با R^2 و RMSE به ترتیب برابر ۰/۹۹۶و ۰/۰۰۶ برای (ANFIS) و ۰/۹۹۲و ۰/۰۰۸ برای مدل شبکه عصبی مصنوعی (ANN) از دقت بالایی برخوردار میباشد و در نهایت با در نظر گرفتن داده های آزمایشگاهی برای محاسبه استهلاک انرژی در پایین دست شیب شکن های مایل مجهز به صفحات مشبک قائم و شیب شکن های مایل ساده روابطی ارائه گردید.

۵- فهرست علائم

E_0	انرژی در بالادست صفحات مشبک
g	شتاب گرانش زمین
P	نسبت تخلخل صفحه مشبک
q	دبی واحد عرض
t	ضخامت صفحات مشبک
y_0	عمق بالادست شیب‌شکن
y_c	عمق بحرانی
y_b	عمق لبه شیب‌شکن
y_1	عمق اولیه پرش هیدرولیکی
y_2	عمق قبل از صفحه مشبک
y_d	عمق پایین‌دست صفحه مشبک
Δz	ارتفاع شیب‌شکن
ρ	جرم مخصوص آب
μ	لزجت دینامیکی
θ	زاویه شیب شیب‌شکن

۶- مراجع

[1] I.I. Esen, J.M. Alhumoud, K.A. Hannan, Energy Loss at a Drop Structure with a Step at the Base, Journal of Water international, 29(4) (2004) 523-529.

[2] Y.M. Hong, H.S. Huang, S. Wan, Drop characteristics of free-falling nappe for aerated straight-drop spillway, Journal of Hydraulic Research, 48(1) (2010) 125-129.

[3] A.R. Kabiri-Samani, E. Bakhshian, M.R. Chamani, Flow characteristics of grid drop-type, dissipaters, Journal of Flow Measurement and Instrumentation, 54(298-306) (2017).

[4] R. Daneshfaraz, S. Sadeghfam, V. Hasannia, Experimental investigating effect of Froude number on hydraulic parameters of vertical drop with supercritical flow upstream, Amirkabir Journal of Civil Engineering, (2019).

[5] C.E. Kindsvater, The hydraulic jump in sloping channels, Transactions ASCE, 1944.

[6] W.E. Wagner, Hydraulic Model Studies of the Check Intake Structure-Potholes East Canal, 1956.

[7] A.J. Peterka, Hydraulic design of stilling basins and energy dissipaters engineering monograph, US Bureau of Reclamation, Denver Colorado, 1958.

[8] A. Ohtsu, Y. Yasuda, Hydraulic jump in sloping channels, Journal of Hydraulic Engineering, 11(7) (1991) 905-921.

[9] M. Sholichin, S. Akib, Development of drop number performance for estimate hydraulic jump on vertical and sloped drop structure, International Journal of Physical Sciences, 5(11) (2010) 1678-1687.

[10] A. Moradi Sabz Koohi, S.M. Kashefipour, M. Bina, Experimental Comparison of Energy Dissipation on Drop Structures, JWSS-Isfahan University of Technology, 15(56) (2011) 209-223.

[11] N. Rajaratnam, K.I. Hurtig, Screen-type energy dissipator for hydraulic structures, Journal of Hydraulic Engineering, 126(4) (2000) 310-312.

[12] P. Cakir, Experimental investigation of energy dissipation through screens Middle East Technical University, Ankara, Turkey, 2003.

[13] G. Balkis, Experimental investigation of energy dissipation through inclined screens Middle East Technical University, Ankara,Turkey, 2004.

[14] V. Aslankara, Experimental investigation of tailwater effect on the energy dissipation through screens, Middle East Technical University, Ankara, Turkey, 2007.

[15] S. Sadeghfam, A.A. Akhtari, R. Daneshfaraz, G. Tayfur, Experimental investigation of screens as energy dissipaters in submerged hydraulic jump, Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences, 38(2) (2015) 126-138.

[16] R. Daneshfaraz, S. Sadeghfam, A. Rezazadeh Joudi, Experimental investigation on the effect of screen's location on the flow's energy dissipation, Journal of Irrigation and Drainage Structures Engineering Research, 17(67) (2017) 47-62.

[17] R. Daneshfaraz, S. Sadeghfam, A. Ghahramanzadeh, Three-dimensional numerical investigation of flow through screens as energy dissipators, Canadian Journal of Civil Engineering, 44(10) (2017) 850-859.

[18] M. Rezaie, A. Qhaderi, R. Daneshfaraz, Experimental Investigation of Clay and Nano-Clay Montmorillonite Effect on Scour Reduction at Downstream of Screen, Journal of Irrigation and Drainage Structures Engineering Research, 19(73) (2019) 1-16.

[19] R. Norouzi, R. Daneshfaraz, A. Ghaderi, Investigation of discharge coefficient of trapezoidal labyrinth weirs using artificial neural networks and support vector machines, Applied Water Science, 9(7) (2019) 148.

[20] S. Sadeghfam, R. Daneshfaraz, R. Khatibi, O. Minaei, Experimental studies on scour of supercritical flow jets in upstream of screens and modelling scouring dimensions

using artificial intelligence to combine multiple models (AIMM), Journal of Hydroinformatics, (2019).

[21] B.A. Bakhmeteff, Hydraulics of open channels 1932.

[22] M.A. Ghorbani, R. Khatibi, B. Hosseini, M. Bilgili, Relative importance of parameters affecting wind speed prediction using artificial neural networks, Journal of Theor Appl Climatol 114(1) (2013).

[23] H. Tabari, S. Marofi, A. Savziparvar, Estimation of daily pan evaporation using artificial neural networks, Journal of Irrigation Science, 16(1) (2010) 47-59.

[24] E.H. Mamdani, Application of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic system, Journal of Fuzzy Sets and Systems 26 (1997) 1182 -1191.

[25] A. Tilmant, P. Fortemps, M. Vanclooster, Effect of averaging operator in fuzzy optimization of reservoir operation, Journal of Water Resources Management 16 (2002) 1-22.

[26] N. Rajaratnam, Turbulent jets Elsevier, 1976

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

R. Norouzi, R. Daneshfaraz , A. Bazyar, The Study of Energy Dissipation Due to the Use of Vertical Screen in the Downstream of Inclined Drops by Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) ,Amirkabir J. Civil Eng., 53(3) (2021) 921-934.

DOI: 10.22060/ceej.2019.16694.6305