



نخستین کنفرانس ملی آبیاری و زهکشی ایران

۲۳ و ۲۴ اردیبهشت ۱۳۹۴  
دانشگاه فردوسی مشهد



## پیش بینی توزیع سرعت در پرش هیدرولیکی روی بستر موج دار سینوسی به روش SVM

رضا بدیع زادگان\* - دانشجوی دکتری سازه های آبی دانشگاه فردوسی مشهد  
کاظم اسماعیلی - دانشیار گروه مهندسی آب دانشگاه فردوسی مشهد  
سعید رضا خدائیاناس - دانشیار گروه مهندسی آب دانشگاه فردوسی مشهد

\*تلفن نویسنده مسئول: ۰۹۱۲۳۲۴۳۴۶۹ - پست الکترونیکی: rbadizadegan@gmail.com

### چکیده

پرش هیدرولیکی یکی از پدیده‌های مهم در علم هیدرولیک می‌باشد که تاکنون تحقیقات زیادی در زمینه آن صورت گرفته و خصوصیات و مشخصاتش گزارش شده است. یکی از مشخصات مهم و ناشناخته در این پدیده الگوی تغییرات سرعت در مقاطع مختلف پرش بوده که به علت کمبود امکانات اندازه‌گیری سرعت در آزمایشگاه‌ها و زمان بر بودن اندازه‌گیری تاکنون در مطالعات صورت گرفته کمتر مورد توجه قرار گرفته است. براساس بررسی مقالات و مطالعات حاضر تعداد ۱۴۱۴ داده سرعت، مربوط به مقاطع و ارتفاع‌های مختلف از پرش‌هایی با اعداد فرود متفاوت روی بسترهای موج دار سینوسی گردآوری شده است. با توجه به محدودیت‌ها و مشکلات برداشت سرعت در نقاط مختلف پرش، این پژوهش با هدف بکارگیری روش ماشین بردار پشتیبان SVM جهت پیش‌بینی سرعت در نقاط مختلف پرش صورت گرفته است. با توجه به نتایج حاصل از این تحقیق می‌توان بیان نمود که این روش مقادیر سرعت در نقاط مختلف پرش را نسبت به نتایج حاصل آزمایشگاه با ضریب تبیین  $R^2$  برابر ۰/۹۸۱۴ و مجذور میانگین مربعات خطا RMSE برابر ۰/۰۲۶ پیش‌بینی می‌کند. از طرف دیگر با توجه به نتایج قابل قبول این روش می‌تواند مقادیر سرعت در نقاط مختلف پرش که در آزمایشگاه اندازه‌گیری نشده را با دادن پارامترهای موثر بر آن، بصورت قابل قبولی برآورد نمود.

**کلید واژه:** پرش هیدرولیکی، ماشین بردار پشتیبان، الگوی تغییرات سرعت، پیش‌بینی سرعت، بسترهای موج دار سینوسی.

# پیش بینی توزیع سرعت در پرش هیدرولیکی روی بستر موج دار سینوسی به روش SVM

رضا بدیع زادگان دانشجوی دکتری سازه های آبی دانشگاه فردوسی مشهد\*

کاظم اسماعیلی دانشیار گروه مهندسی آب دانشگاه فردوسی مشهد

سعید رضا خدائشناس دانشیار گروه مهندسی آب دانشگاه فردوسی مشهد

پست الکترونیکی: rbadizadegan@gmail.com

\*تلفن نویسنده اصلی: ۰۹۱۲۳۲۴۳۴۶۹

## چکیده:

پرش هیدرولیکی یکی از پدیده‌های مهم در علم هیدرولیک می‌باشد که تاکنون تحقیقات زیادی در زمینه آن صورت گرفته و خصوصیات و مشخصاتش گزارش شده است. یکی از مشخصات مهم و ناشناخته در این پدیده الگوی تغییرات سرعت در مقاطع مختلف پرش بوده که به علت کمبود امکانات اندازه‌گیری سرعت در آزمایشگاه‌ها و زمان بر بودن اندازه‌گیری تاکنون در مطالعات صورت گرفته کمتر مورد توجه قرار گرفته است. براساس بررسی مقالات و مطالعات حاضر تعداد ۱۴۱۴ داده سرعت، مربوط به مقاطع و ارتفاع های مختلف از پرش هایی با اعداد فرود متفاوت روی بسترهای موج دار سینوسی گردآوری شده است. با توجه به محدودیت ها و مشکلات برداشت سرعت در نقاط مختلف پرش، این پژوهش با هدف بکارگیری روش ماشین بردار پشتیبان SVM جهت پیش بینی سرعت در نقاط مختلف پرش صورت گرفته است. با توجه به نتایج حاصل از این تحقیق می‌توان بیان نمود که این روش مقادیر سرعت در نقاط مختلف پرش را نسبت به نتایج حاصل آزمایشگاه با ضریب تبیین  $R^2$  برابر ۰/۹۸۱۴ و مجذر میانگین مربعات خطا RMSE برابر ۰/۰۲۶ پیش بینی می‌کند. از طرف دیگر با توجه به نتایج قابل قبول این روش می‌تواند مقادیر سرعت در نقاط مختلف پرش که در آزمایشگاه اندازه گیری نشده را با دادن پارامترهای موثر بر آن، بصورت قابل قبولی برآورد نمود.

کلید واژه‌ها: پرش هیدرولیکی، ماشین بردار پشتیبان، الگوی تغییرات سرعت، پیش بینی سرعت، بسترهای موج-دار سینوسی

## ۱- مقدمه

پرش هیدرولیکی به عنوان یکی از مکانیسم‌های استهلاک انرژی جریان فوق بحرانی در پایین دست سرریزها، شیب شکن‌ها و دریچه‌ها شناخته شده است. تاکنون محققین مختلفی روی خصوصیات اصلی پرش از جمله نسبت اعماق ثانویه به اولیه، طول پرش، طول غلطاب و استهلاک انرژی مطالعات متفاوتی انجام داده اند ولی در زمینه تغییرات سرعت در امتداد طول پرش به علت کمبود امکانات و مشکلات اندازه‌گیری سرعت تا بحال بررسی‌های محدودی انجام شده

است. اید و راجاراتنام (۲۰۰۲) مطالعات آزمایشگاهی خود را در خصوص پرش هیدرولیکی روی بستر موج‌دار سینوسی انجام دادند. پژوهش آنها در بازه اعداد فرود ۴ تا ۱۰ و زبری سینوسی بستر با طول موج ۶۸ میلی‌متر و اعماق موج ۱۳ و ۲۲ میلی‌متر بود. همچنین حدوداً ۲۹۳ داده سرعت مربوط به دو پرش در قالب ۱۶ پروفیل سرعت در مقاطع مختلف با عدد فرود ۵/۸ برای هر دو نوع بستر سینوسی ارائه نموده اند [۱]. ایزدجو و همکاران (۱۳۸۳) مطالعاتی در زمینه پرش هیدرولیکی روی بسترهای زبر به شکل نوارهای با مقطع دوزنقه ای انجام دادند طول موج زبری ها S برابر ۳۴، ۶۸ و ۱۳۵ میلی‌متر و اعماق زبری های ۱۳ و ۲۶ میلی‌متر بوده. آنها ۱۸ پروفیل سرعت در دو پرش هیدرولیکی با اعداد فرود ۶/۳ و ۸ ارایه کردند [۲]. عباسپور و همکاران (۲۰۰۹) همچنین مطالعات آزمایشگاهی در زمینه پرش هیدرولیکی روی بسترهای موج‌دار سینوسی در محدوده عدد فرود ۳/۸ تا ۸/۶ با مقادیر طول موج S ۴۰ و ۷۰ میلی‌متر با عمق موج های ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۵ در کانالی به عرض ۲۵ سانتیمتر و عمق ۴۰ سانتیمتر انجام دادند. در این تحقیق تعداد ۷۶۶ داده سرعت مربوط به ۶ پرش با مشخصات متفاوت در مقاطع مختلف بصورت پروفیل‌های سرعت ارائه شده است [۳]. بدیع زادگان و همکاران (۱۳۹۰) مطالعات آزمایشگاهی دیگری روی بسترهای موج‌دار سینوسی با عمق اولیه ۱/۳ سانتیمتر و مقادیر طول موج های S ۲۰، ۳۰ و ۶۰ میلی‌متر و اعماق موج ۱۰، ۲۰ و ۳۰ میلی‌متر در کانالی به عرض ۳۰ سانتیمتر و عمق ۴۰ سانتیمتر انجام دادند. آنها ۷۳۸ داده سرعت در مقاطع و ارتفاع‌های مختلف مربوط به ۲۱ پرش هیدرولیکی روی سه شیب صفر، ۳/۷۵- و ۵- درصد را بصورت ۶۳ پروفیل سرعت اندازه‌گیری و ارائه نمودند [۴].

از آنجا که بکارگیری و ساخت مدل‌های آزمایشگاهی به جهت آشنای با رفتار پدیده های فیزیکی و هیدرولیکی در شرایط مختلف مناسب و مفید می باشد اما باید این موضوع را نیز در نظر داشت که علاوه بر هزینه های اقتصادی و زمان بر بودن این نوع از تحقیقات، بررسی همه جانبه تمام خصوصیات این پدیده‌ها، کاری دشوار و نشدنی می‌باشد از این رو لزوم بکارگیری روش‌های تکمیلی نظیر روش‌های هوش مصنوعی در پیش بینی رفتار این پدیده ها در سایر شرایط دیده می شود. یکی از روش‌های هوش مصنوعی روش بردار ماشین پشتیبان SVM می‌باشد که با این روش، مطالعات محدودی در زمینه مسایل مهندسی آب و هیدرولیک، انجام شده ولی در زمینه پیش بینی الگوی تغییرات سرعت جریان تا بحال مطالعاتی صورت نگرفته است. از این رو این پژوهش با هدف جمع آوری داده های سرعت در مقاطع مختلف پرش هیدرولیکی روی بسترهای موج‌دار سینوسی و بکارگیری روش بردار ماشین پشتیبان SVM به عنوان یک روش پیش بینی جهت برآورد تغییرات سرعت در طول پرش صورت گرفته است.

## ۲- روش تحقیق

### ۲-۱- آماده سازی داده ها

اطلاعات استفاده شده در این تحقیق داده های آزمایشگاهی مطالعات اید و راجاراتنام (۲۰۰۲) [۱]، عباسپور و همکاران (۲۰۰۹) [۳] و بدیع‌زادگان و همکاران (۱۳۹۰) [۴] می‌باشد که مشخصات کلی آنها در جدول ۱ ارائه شده است. شایان ذکر از آنجایی که خصوصیات و شرایط تشکیل پرش مانند عرض کانال، عمق اولیه پرش، طول پرش و ... در هر یک از مطالعات متفاوت می باشند برای یکسان سازی و از بین بردن اثر بعد این پارامترها با بکارگیری آنالیز ابعادی روش پی باکینگهام تمام اطلاعات ورودی و خروجی مدل به اعداد بی بعد تبدیل شده اند. از طرف دیگر به جهت اینکه هر یک از پارامترها بکار گرفته شده دارای بازه تغییرات متفاوتی می‌باشند تمامی پارامترها ورودی به مدل، نرمال سازی شده اند.

جدول ۱- مشخصات پرش‌های هیدرولیکی استفاده شده در مطالعات حاضر

نام محققین	بازه اعداد فرود $Fr_1$	شیب بستر $S_0$	عمق اولیه $y_1$ (mm)	عرض کانال $b$ (cm)	بازه طول پرش $L_j$ (m)	طول موج $S$ (mm)	عمق موج $t$ (mm)
اید و راجاراتنام (۲۰۰۲)	۵/۸	صفر	۵۰/۸	۴۴/۶	۱/۰۲-۱/۲۲	۶۸	۱۳، ۲۲
عباسپور و همکاران (۲۰۰۹)	۴/۴-۸/۱	صفر	۲۰، ۲۱/۵، ۴۰، ۲۲/۵	۲۵	۰/۶۴-۰/۷۵	۴۰، ۷۰	۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۵
بدیع زادگان و همکاران (۱۳۹۰)	۱۰/۵۵-۱۱/۲۲	صفر -۳/۷۵٪ -۵٪	۱۳	۳۰	۰/۶۴۵-۰/۸۹۵	۲۰، ۴۰، ۶۰	۱۰، ۲۰، ۳۰

## ۲-۱-۱- آنالیز ابعادی

ویژگی های پرش هیدرولیکی روی بسترهای موج دار سینوسی متاثر از خصوصیات سیال، مشخصات فیزیکی بستر و شرایط هیدرولیکی جریان می باشد. سرعت پرش در نقطه  $U$  روی بسترهای سینوسی را می توان وابسته به عمق اولیه پرش  $y_1$ ، سرعت اولیه پرش  $U_1$ ، عمق ثانویه پرش  $y_2$ ، طول موج  $S$  و عمق موج  $t$  زبری سینوسی، طول پرش  $L_j$ ، شیب بستر پرش  $S_0$ ، ارتفاع نقطه ای در داخل پرش که سرعت در آن مد نظر می باشد  $Y$ ، فاصله این نقطه از ابتدای پرش هیدرولیکی  $X$ ، عرض کانال  $b$ ، شتاب ثقل  $g$ ، لزجت دینامیکی  $\mu$  و جرم مخصوص  $\rho$  دانست (رابطه ۱). با استفاده از روش پی باکینگهام گروه های بدون بعد موثر بر سرعت نقطه ای در پرش هیدرولیکی بصورت زیر بدست می آیند (رابطه ۲).

$$U = f(y_1, v_1, y_2, S, t, L_j, S_0, Y, X, b, g, \mu, \rho) \quad (1)$$

$$\frac{U}{v_1} = f\left(\frac{v_1}{g y_1}, \frac{v_1 y_1 \rho}{\mu}, S_0, \frac{X}{y_1}, \frac{L_j}{y_1}, \frac{Y}{y_1}, \frac{y_2}{y_1}, \frac{t}{y_1}, \frac{S}{y_1}, \frac{b}{y_1}\right) \quad (2)$$

در رابطه (۲)  $t/y_1$  و  $S/y_1$  به ترتیب ارتفاع و طول موج بی بعد شده زبری های سینوسی می باشند که از تقسیم آنها بر یکدیگر، گروه جدید  $t/S$  حاصل می گردد که به عنوان شیب موج شناخته می شود از طرفی پس از ادغام سایر پارامترها رابطه ساده شده زیر بدست می آید.

$$\frac{U}{v_1} = f\left(Fr_1, Re_1, S_0, \frac{X}{L_j}, \frac{Y}{y_2}, \frac{t}{S}, \frac{b}{y_1}\right) \quad (3)$$

در تابع فوق  $Fr_1$  عدد فرود اولیه،  $Re_1$  عدد رینولدز اولیه جریان می باشد. از آنجا که عدد رینولدز اولیه در پرش هیدرولیکی قطعاً بیشتر از ۲۰۰۰ می باشد می توان از اثر لزجت صرف نظر نمود و تغییرات سرعت در هر نقطه از پرش نسبت به سرعت اولیه را تابعی از پارامترهای زیر دانست.

$$\frac{U}{v_1} = f\left(Fr_1, S_0, \frac{X}{L_j}, \frac{Y}{y_2}, \frac{t}{S}, \frac{b}{y_1}\right) \quad (4)$$

## ۲-۱-۲- نرمال سازی داده ها

داده های آزمایشگاهی مورد استفاده در این تحقیق در مجموع ۱۴۱۴ داده سرعت در مقاطع و ارتفاع های مختلف در داخل پرش های هیدرولیکی می باشد. از آنجا که محدوده تغییرات پارامترها متفاوت بوده، برای یکسان کردن بازه تغییرات داده ها با استفاده از ماکزیمم و مینیمم هر پارامتر و رابطه (۵) داده ها در بازه اعداد صفر و یک نرمال شده و بعد از مخلوط کردن آنها ۷۰ درصد کل برای آموزش و ۳۰ درصد مابقی برای آزمون در نظر گرفته شده اند.

$$x_{normal} = \frac{x_i - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad (5)$$

## ۲-۲- روش ماشین بردار پشتیبان

روش ماشین بردار پشتیبان یکی از روش های هوش محاسباتی<sup>۱</sup> می باشد و به عنوان ابزاری برای رگرسیون توسط واپنیک در سال ۱۹۹۵ ارائه شده است [۵]. بصورت کلی کاربرد این روش دسته بندی، رگرسیون و پیش بینی سری های زمانی می باشد.

در این تحقیق جهت رگرسیون بوسیله روش SVM تابع  $y=f(x_i)$  بین یک سری داده های ورودی  $x_i = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}, x \in R^n$  و مقادیر هدف  $y_i = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}, y \in R$  تخمین زده می شود که  $x_i$  ها متغیرهای مستقل مسئله همچون عدد فرود اولیه  $Fr_1$ ، نسبت فاصله افقی نقطه مورد نظر به طول پرش  $X/L$ ، شیب بستر  $S_0$ ، نسبت عمق متناظر با سرعت به عمق ثانویه پرش  $Y/y_2$ ، شیب موج زبری  $t/S$  و نسبت عرض کانال به عمق اولیه پرش  $b/y_1$  می باشد و  $y_i$  نیز مقادیر نسبت سرعت نقطه در پرش به سرعت اولیه است. در حالتی که داده ها بصورت خطی قابل تفکیک باشند می توان از رابطه زیر استفاده نمود.

$$f(x_i) = w_i x_i + b \quad (6)$$

در رابطه بالا  $x_i$  بردار متغیرهای ورودی  $w_i$  وزن بردار ورودی و  $b$  میزان بایاس یا عرض از مبدا می باشد که از داده های ارائه شده به مدل تخمین زده می شود. در این روش نکته اساسی یافتن بهترین تابع  $f(x_i)$  می باشد بصورتی که تابع ریسک عملیاتی مینیمم شود:

$$Q = \sum_{i=1}^N L(y_i - f(x_i)) \quad (7)$$

که در رابطه بالا تابع  $L$  تابع جریمه برای اندازه گیری انحراف بین مقادیر آزمایشگاهی (هدف) با مقادیر  $f(x_i)$  پیش بینی شده می باشد. در حالتی که تابع پارامترهای  $(x_i, y_i)$  مشخص نباشد تابع ریسک عملیاتی به صورت مستقیم قابل حل نبوده و باید از تابع ارزش پیشنهادی توسط واپنیک استفاده شود [۶].

$$C \sum_{i=1}^N L_{\epsilon}(y_i - f(x_i)) + \frac{1}{2} \|w\|^2 \quad (8)$$

در رابطه بالا  $\|w\|$  نرم هندسی بردار وزنی و  $C$  یک پارامتر کنترل یا جریمه می باشد که با ارزیابی پیچیدگی مدل و خطای آموزش تعیین می شود.  $L_{\epsilon}$  تابع عدم حساسیت  $\epsilon$  می باشد در صورتی که میزان اختلاف مقادیر اندازه گیری و پیش بینی کمتر از میزان خطا  $\epsilon$  باشد در آن زمان می توان از خطا چشم پوشی کرد [۶].

$$L_{\varepsilon}(y_i, f(x_i)) = \begin{cases} 0 & \text{if } |y_i - f(x_i)| \leq \varepsilon \\ |y_i - f(x_i)| - \varepsilon & \text{otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

داده ها در محدوده  $|y_i - f(x_i)| \leq \varepsilon$  قابل صرف نظر می باشند و داده های خارج از مرز  $\varepsilon$  و روی آن، بردار پشتیبان نامیده می شوند که تنها بردارهای پشتیبان در حل بهینه مسئله کمک می کنند. مشکل بهینه سازی کمینه کردن رابطه ریسک عملیاتی (رابطه (۸)) با توجه به شروط آن (رابطه (۹)) می باشد که این امر با استفاده از ضرایب لاگرانژی قابل انجام است که در این صورت می توان رابطه (۶) را بصورت زیر نوشت :

$$f(x_i) = \sum (a_i^* - a_i) K(x_i, x) + b \quad (10)$$

در رابطه بالا  $a_i^*, a_i \geq 0$  ضرایب لاگرانژی،  $b$  عرض از مبدا یا بایاس و  $K(x_i, x)$  تابع کرنل می باشد. توابع کرنل توابعی هستند که داده هایی با قابلیت غیر خطی را به بعدی بالاتر نگاشت می دهند تا بتوان آنها را بصورت خطی دسته بندی نمود. متداول ترین توابع کرنلی که می توان به آنها اشاره نمود توابع سیگمویدی Sigmoid، خطی Linear، چند جمله ای Polynomial، پایه شعاعی RBF و ... می باشند. تابع کرنل استفاده شده در این تحقیق تابع پایه شعاعی RBF می باشد که بصورت زیر است.

$$K(x, y) = \exp(-\gamma \|x - y\|^2) \quad (11)$$

ضریب  $\gamma$  در رابطه بالا همانند پارامتر  $C$  باید از سعی و خطا بدست بیاید .

به جهت آموزش این روش ۷۰ درصد داده ها (۹۹۰ داده سرعت) بصورت تصادفی انتخاب و این روش را آموزش داده و مابقی داده ها که ۳۰ درصد کل می باشند (۴۲۴ داده سرعت) برای تست در نظر گرفته شده اند در این تحقیق برای مقایسه بهتر، مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) که از رابطه (۱۲) محاسبه می گردد به همراه ضریب تبیین  $R^2$  ارائه شده است.

$$RMSE = \sqrt{1/n \sum (U_{\text{exp}} - U_{\text{pre}})^2} \quad (12)$$

در رابطه بالا  $n$  تعداد داده ها،  $U_{\text{exp}}$  مقادیر سرعت اندازه گیری شده در آزمایشگاه و  $U_{\text{pre}}$  مقادیر پیش بینی شده سرعت با روش SVM می باشند.

### ۳- نتایج و بحث

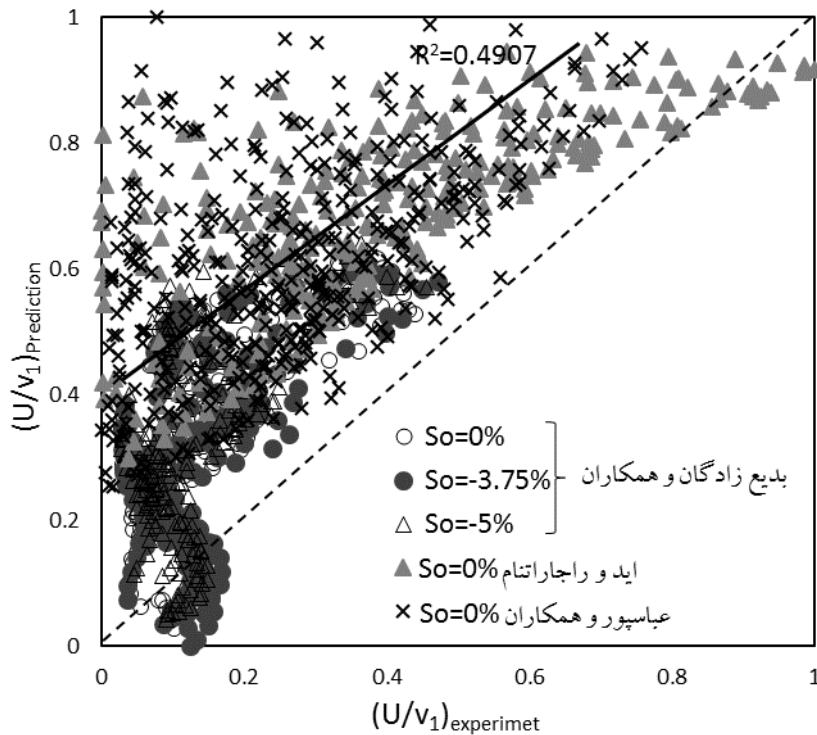
در این بخش با توجه به بی بعد سازی و نرمال شدن پارامترها موثر، با دو روش رگرسیون چند متغیره و ماشین بردار پشتیبان SVM اقدام به پیش بینی سرعت در نقاط مختلف پرش کرده و نتایج آزمایشگاهی و پیش بینی را با هم مقایسه می کنیم.

#### ۳-۱- پیش بینی مقادیر سرعت با استفاده از رگرسیون چند متغیره بوسیله Excel

با استفاده از ابزار تحلیل داده Data Analysis نرم افزار اکسل به روش رگرسیون چند متغیره مقادیر سرعت پرش را براساس متغیرهای مستقل پیش بینی کرده که در نهایت رابطه زیر بدست آمده است.

$$\frac{U}{v_1} = -0.0843 \times Fr_1 + 0.0042 \times S_0 - 0.2155 \times \frac{X}{L_j} - 0.1847 \times \frac{Y}{y_2} - 0.03 \times \frac{t}{S} + 0.01824 \times \frac{b}{y_1} + 0.85 \quad (13)$$

با توجه به پیش بینی های سرعت در این روش میزان ضریب تبیین  $R^2$  برابر ۰/۴۹۰۷ و میزان مجذور میانگین مربعات خطا RMSE برابر ۰/۱۳ بدست آمده است که این نتیجه نشان دهنده ناکارآمدی روش رگرسیون چند متغیره جهت پیش بینی سرعت در داخل پرش هیدرولیکی می باشد. در شکل (۱) مقادیر سرعت در نتایج آزمایشگاهی نسبت به نتایج پیش بینی از این روش در مقابل هم ترسیم شده است.



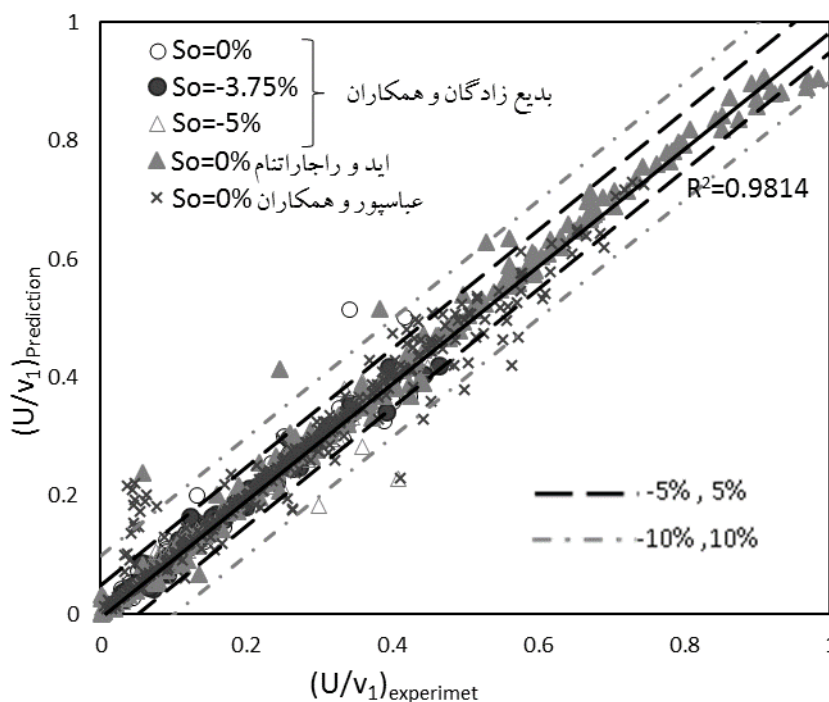
شکل ۱- مقادیر سرعت از نتایج آزمایشگاهی در مقابل نتایج پیش بینی با روش رگرسیون چند متغیره

### ۳-۲- پیش بینی مقادیر سرعت با استفاده از روش ماشین بردار پشتیبان SVM

همانطور که قبلا ذکر شد در این روش از آنجا که داده ها بصورت خطی تفکیک پذیر نمی باشند برای نگاشت این داده ها به بعدی بالاتر از تابع کرنل پایه شعاعی RBF استفاده شده که براساس سعی خطی بهینه ترین ضریب تابع کرنل  $\gamma$  برابر ۱۴ بدست آمده همچنین مقدار پارامتر جریمه یا پنالتی C و پارامتر خطا  $\epsilon$  در بهترین حالت به ترتیب ۳ و ۰/۰۰۰۳۶ انتخاب گردید. شایان ذکر است بررسی این روش در محیط نرم افزاری MATLAB با کد libsvm صورت گرفته است. در جدول (۲) مقادیر ضریب تبیین  $R^2$  و میزان مجذور میانگین مربعات خطا RMSE برای مراحل آموزش، آزمایش و صحت سنجی (انجام شده با کل ۱۴۱۴ داده) ارائه شده که ضریب تبیین نزدیک به یک و کوچک بودن میزان RMSE مبین قدرت بالای پیش بینی این روش است. همچنین در شکل (۲) مقادیر سرعت در نتایج آزمایشگاهی نسبت به نتایج پیش بینی از این روش در مقابل هم نشان شده است.

جدول ۲- پارامترهای ارزیابی مدل SVM در مراحل آموزش تست و صحت سنجی

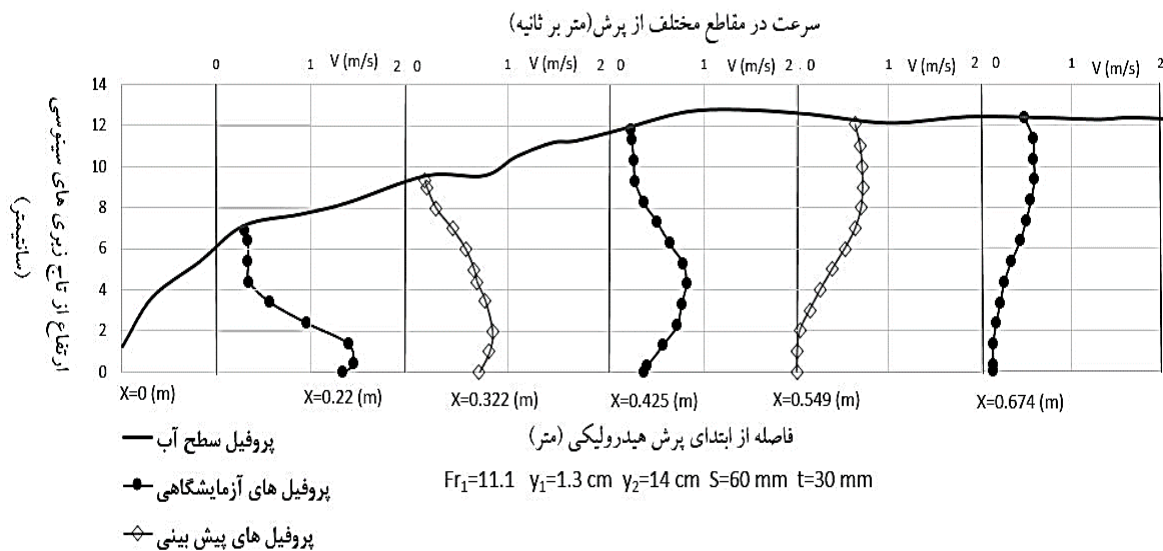
مراحل مدل	تعداد داده ها	ضریب تبیین $R^2$	مجدور میانگین مربعات خطا RMSE
آموزش	۹۹۰	۰/۹۸۸	۰/۰۲۶۶
آزمایش	۴۲۴	۰/۹۷۰۱	۰/۰۲۰۲
صحت سنجی	۱۴۱۴	۰/۹۸۱۴	۰/۰۳۲۳



شکل ۲- مقادیر سرعت از نتایج آزمایشگاهی در مقابل نتایج پیش بینی با ماشین بردار پشتیبان SVM

همانطور که در شکل ۲ مشاهده می شود میزان پراکندگی داده های پیش بینی نسبت به داده های آزمایشگاهی به روش SVM در محدوده مثبت و منفی ۵ درصد خطا قرار دارد از سوی دیگر تعداد کمی از نقاط خارج از خط ۱۰ درصد خطا می باشد و این امر بیان کننده دقت بالای این روش در پیش بینی سرعت در نقاط مختلف پرش هیدرولیکی است. از آنجایی که مدل بردار پشتیبان SVM به عنوان یک مدل رگرسیونی مقادیر سرعت حاصل از نتایج آزمایشگاهی را با دقت بالا پیش بینی می کند به این منظور برای برآورد سرعت سایر نقاط در داخل پرش که در آزمایشگاه اندازه گیری نشده اند متغیرهای مستقل خصوصیات پرش  $(Fr_1, S_0, \frac{X}{L_j}, \frac{Y}{y_2}, \frac{t}{S}, \frac{b}{y_1})$  برای شرایط جدید به مدل ارائه شده تا مدل مقادیر سرعت در این نقاط را پیش بینی کند. در شکل ۳ سه پروفیل سرعت اندازه گیری شده در آزمایشگاه با فواصل مساوی نسبت به ابتدای پرش نشان داده شده است و دو پروفیل سرعت ما بین آنها حاصل از نتایج پیش بینی مدل SVM می باشد.





شکل ۳- پیش بینی پروفیل های سرعت پرش هیدرولیکی به ماشین بردار پشتیبان SVM

#### ۴- نتیجه گیری

با توجه به مقایسه مدل رگرسیونی ماشین بردار پشتیبان SVM با رگرسیون چند متغیره، روش SVM به علت آن که مقدار ضریب تبیین  $R^2$  آن نزدیک به یک بوده و میزان مجذور میانگین مربعات خطایش RMSE ناچیز است پیش بینی قابل قبولی از مقادیر سرعت اندازه گیری شده ارایه می دهد. در این مدل با سعی و خطا مقدار بهینه ضریب تابع کرنل  $\gamma$  برابر ۱۴ و پارامترهای C و  $\epsilon$  به ترتیب ۳ و  $0.00036$  بدست آمده اند. از طرفی این مدل سایر پروفیل های سرعت پرش هیدرولیکی که در آزمایشگاه اندازه گیری نشده اند را نیز بصورت قابل قبولی پیش بینی می کند.

#### ۵- منابع

- [1] Ead, S.A. and Rajaratnam, N. (2002). Hydraulic jump on corrugated beds. Journal of Hydraulic Engineering. ASCE, 128(7): 656-663.
- [2] Izadjoo, F. and Shafai-Bejestan, M. (2007). Corrugated bed hydraulic jump stilling basin. Journal of Applied Sciences 7 (8), 1164-1169.
- [3] Abbaspour, A., Hosseinzadeh Dalir, A., Farsadizadeh, D. and Sadraddini, A. A. (2009). Effect of Sinusoidal Corrugated Bed on Hydraulic Jump Characteristics. Journal of Hydro-Environment Research, 3(2): 109-117.
- [۴] بدیع زادگان، ر. و اسماعیلی، ک. و فغفور مغربی، م. و صانعی، م. (۱۳۸۹). مطالعه آزمایشگاهی پرش هیدرولیکی روی بسترهای موج دار سینوسی با شیب کف معکوس. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد.
- [5] Cortes, C. and Vapnik, V., (1995). Support Vector Networks. Machine Learning, 20:1-25.
- [6] Vapnik, V. N., (1995). The Nature of Statistical Learning Theory. Springer, New York.