

پیش‌بینی و ارزیابی عمق آبشستگی در زیر خطوط لوله با استفاده از روش‌های پایه کرنلی برای جریان‌های یکنواخت

کیومرث روشنگر^{۱*}، شیما شفیعی نائیبی^۲، محمدعلی لطف‌الهی یقین^۳، مهرداد رمضان‌لر^۴

^۱ استاد گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

^۲ کارشناسی ارشد عمران- سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

^۳ استاد گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

^۴ کارشناسی ارشد مکانیک- سیالات، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه خواجه‌نصیرالدین طوسی

دریافت: ۱۴۰۰/۹/۸، پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۲، نشر آنلاین: ۱۴۰۰/۱۲/۲

چکیده

با عبور خطوط لوله از بستر رودخانه، دریا و اقیانوس‌ها باعث ایجاد تغییراتی در الگو جریان می‌شود. در نتیجه این تغییرات، تنش برشی بستر و آشفستگی جریان افزایش می‌یابد و خاک بستر زیر این خطوط را دچار آبشستگی کرده و گودال آبشستگی به‌وجود می‌آید در صورت وقوع این اتفاق خسارات جبران‌ناپذیر محیط زیستی و مالی ایجاد می‌کند. از این‌رو بررسی عمق گودال آبشستگی و عوامل مؤثر در به‌وجود آمدن سال‌ها است که مورد بررسی قرار گرفته است و محققین به‌صورت تجربی و آزمایشگاهی و به‌صورت عددی و با استفاده از روش‌های نوین و مدل‌سازی‌ها و بهره‌گیری از هوش مصنوعی سعی در پیش‌بینی دقیق‌تر این پدیده دارند. در این تحقیق به تأثیر عوامل متعددی بر آبشستگی زیر خطوط لوله در جریان یکنواخت با استفاده از روش رگرسیون فرایند گاوسی، GPR (Gaussian Process Regression) و ماشین بردار پشتیبان، SVM (Support Vector Machines) و مقایسه نتایج آن با روابط ارائه‌شده، پرداخته شده است. بدین منظور داده‌های آزمایشگاهی متعددی مورد استفاده قرار گرفته و پس از تعریف چندین پارامتر بدون بعد، عملکرد روش‌های مذکور مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج به‌دست آمده به‌خوبی نشان می‌دهد این روش‌ها کارایی بهتری نسبت به روابط تجربی دارند. بررسی‌ها نشان داد مدل ماشین بردار پشتیبان با متغیرهای ورودی Re ، D/d ، h/D و So با دارا بودن مقادیر معیارهای ارزیابی (Root Mean Square Error) RMSE برابر 0.084 ، R برابر 0.877 و NSE برابر 0.767 بهترین نتیجه و عملکرد را دارد. لازم به‌ذکر است پارامترهای D/d و h/D بیش‌ترین تأثیر را بر روی عمق آبشستگی زیر خطوط لوله را دارند.

کلیدواژه‌ها: پیش‌بینی عمق آبشستگی، خطوط لوله، جریان یکنواخت، روش‌های کرنل محور، فرآیند رگرسیون گاوسی، ماشین بردار پشتیبان.

۱- مقدمه

در جریان ایجاد کرده که باعث افزایش تنش برشی و آشفستگی سیال می‌شود. همین افزایش، سبب بیشتر شدن ظرفیت حمل رسوب و در نتیجه آبشستگی می‌شود و به‌وجود آمدن حفره در زیر لوله نشان داده شده است. با بزرگ‌تر شدن چاله آبشستگی تنش‌ها و بارهای نوسانی باعث خستگی و گسیختگی لوله‌ها می‌شود (Azamathulla و همکاران، ۲۰۱۴؛ Zhang و همکاران، ۲۰۱۶).

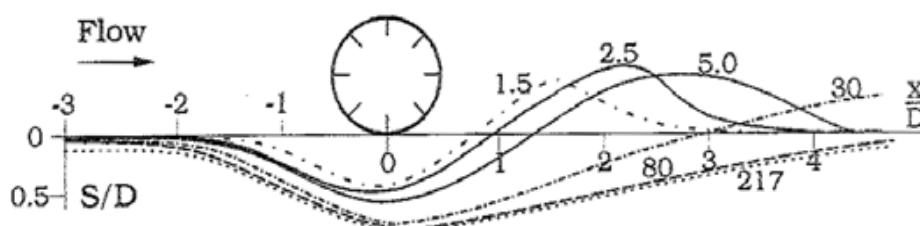
در هر کشوری خطوط لوله انتقال‌دهنده سیالات، یکی از مهم‌ترین عوامل توسعه و رشد اقتصادی آن کشور محسوب می‌شود. این خطوط برای انتقال سوخت‌های سیال همانند نفت و گاز، پسماندها و فاضلاب‌ها و یا برای انتقال هر سیال دیگر استفاده می‌شوند. در نتیجه هر خسارت و خرابی در آن‌ها هزینه‌های گزاف مالی و زیست‌محیطی به‌وجود می‌آورد. این خطوط لوله هنگامی که بر روی بستر رودخانه، دریا و اقیانوس قرار می‌گیرند، تغییراتی

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۴۱-۳۳۳۹۲۵۴۴

آدرس ایمیل: roshangari@tabrizu.ac.ir (ک. روشنگر)، shafi.sh94@gmail.com (ش. شفیعی نائیبی)، lotfollahi@tabrizu.ac.ir

(م. ع. لطف‌الهی یقین)، mehrdad.ramazanilar@gmail.com (م. رمضان‌لر).

و سرعت جریان (V) ارائه کردند. آن‌ها به بررسی آبستگي موضعی در اطراف لوله‌های خوابانیده شده بر کف دریا تحت جریان یکنواخت و یک‌بعدی پرداختند و بیان کردند که عمق آبستگي در شرایط بستر فرسایشی فقط به سرعت جریان و قطر لوله بستگی دارد. پس از مقایسه نتایج به دست آمده از رابطه ارائه شده توسط آن‌ها با یک مدل تجربی، مشاهده شد که این رابطه عمق آبستگي را کمتر از مقدار واقعی محاسبه می‌کند.



شکل ۱- گسترش حفره آبستگي با گذر زمان (Sumer و همکاران، ۱۹۸۸)

با سرعت جریان غیر مغشوش می‌شود، آبستگي به حالت تعادل میل می‌کند. همچنین نشان دادند در مرحله تعادل انتقال رسوب در تمام مقاطع در روی بستر نرخ یکسانی دارد؛ در نتیجه فرآیند آبستگي متوقف می‌شود.

Chiew در سال ۱۹۹۰ در تحقیقی علت اصلی شروع آبستگي در زیر لوله را پدیده پایپینگ^۳ معرفی کرد. Sumer و Fredsoe در تحقیق سال ۱۹۹۰ خود دست یافتند که آبستگي در بستر فعال تغییرات کمی با پارامتر شیلدز^۴ دارد، زبری سطح لوله تأثیری بر آبستگي ندارد و فاصله لوله نسبت به بستر پارامتر مهمی در تخمین عمق آبستگي متعادل است. Chiew در سال ۱۹۹۱ نشان داد تأثیر عمق آب زمانی بیشتر است که عمق کمتر باشد. این مسئله توسط Aguirre و Moncada نیز در سال ۱۹۹۹ بررسی شد. این پژوهشگران اثر عمق آب را در عدد فرود محاسبه کردند. آن‌ها بیان کردند چون سرعت در شکاف با افزایش عدد فرود بیشتر می‌شود، می‌توان گفت عمق آبستگي با افزایش عدد فرود افزایش می‌یابد.

Moncada و Aguirre-Pe در سال ۱۹۹۹ نشان دادند که هنگامی که عدد رینولدز^۴ لوله، مابین 8×10^3 و 3×10^4 است، تأثیر چشم‌گیری بر پدیده آبستگي ندارد. درحالی‌که هرچه عدد فرود افزایش می‌یابد طول و عمق حفره آبستگي نیز افزایش پیدا می‌کند. همچنین قطر ذرات خاک بستر نیز بر روند آبستگي تأثیرگذار است؛ به‌طوری‌که هرچه قطر ذرات ریزتر باشد، حفره

به دلیل اهمیت و خطراتی که در صورت عدم توجه به این پدیده برای محیط‌زیست به وجود خواهد آمد و همچنین ضررهای اقتصادی که به دولت‌ها وارد می‌کند، تحقیق و بررسی این پدیده از سال‌ها قبل تا کنون ادامه داشته. این مطالعات به صورت تجربی و آزمایشگاهی توسط محققین زیادی بررسی شد و در سال‌های اخیر توسط نرم‌افزارها و روش‌های نوین تر مورد بررسی قرار گرفته است.

Kjeldsen و همکاران در سال ۱۹۷۳ اولین محقق‌هایی بودند که یک رابطه تجربی بین عمق تعادل آبستگي (S)، قطر لوله (D)

Leeuwestein و Bijker در سال ۱۹۸۴ آزمایش‌هایی بر روی بستر ماسه‌ای انجام دادند. به نظر آن‌ها عمق آبستگي زیر لوله به قطر لوله، موقعیت لوله، اندازه رسوبات، سرعت جریان و عمق جریان بستگی دارد. در نهایت رابطه تجربی را برای تخمین حداکثر عمق آبستگي پیشنهاد کردند. پس از ارزیابی معلوم شد که این رابطه مقدار عمق حداکثر آبستگي را کمتر از مقدار واقعی محاسبه می‌کند. Ibrahim و Nalluri در سال ۱۹۸۶ آبستگي موضعی را اطراف خطوط لوله تحت شرایط جریان یک‌بعدی بررسی کردند و روابط تجربی برای تخمین عمق آبستگي در شرایط آب صاف و بستر فرسایشی به دست آوردند و اظهار کردند که عمق آبستگي به سرعت جریان، قطر لوله و عمق جریان بستگی دارد.

Maza (۱۹۸۷) آبستگي موضعی را در زیر لوله در جریان‌های مختلف بررسی کرد و نشان داد که عمق آبستگي را می‌توان به صورت تابعی از عدد فرود و فاصله آزاد بدون بعد بین لوله و بستر اولیه در نظر گرفت. وی بیان کرد با قرار دادن لوله در عمق مناسبی زیر بستر به نام حداقل عمق پوشش^۱ می‌توان از آبستگي جلوگیری کرد. در سال ۱۹۹۰، Jensen و همکارانش نشان دادند که بزرگ‌تر شدن تنش برشی بستر زیر لوله منجر به افزایش انتقال رسوب می‌شود. آن‌ها پس از اندازه‌گیری سرعت در نزدیکی بستر نتایج زیر را به دست آوردند. درحالی‌که سرعت زیر لوله در مرحله تونل فرسایشی به شدت افزایش می‌یابد، ولی در نهایت وقتی برابر

3. Shields Parameter
4. Reynolds Number

1. Minimum depth of cover
2. Piping

خطوط لوله تحت جریان یکنواخت را مورد مطالعه قرار دادند و بیان کردند که مکان آبشستگی بیشینه در لوله‌های لرزان متفاوت با لوله‌های ثابت است و برای فرآیند جفت شدن آبشستگی و ارتعاش موضعی حداکثر دامنه ارتعاش خط لوله می‌تواند به حدود ۱/۲D برسد.

در تحقیق پیش‌رو نیز پدیده آبشستگی زیر خطوط لوله تحت جریان یکنواخت توسط دو روش عدد ماشین بردار پشتیبان و فرآیند رگرسیون گاوسی مورد بررسی قرار می‌گیرد و با مقایسه نتایج حاصل از مدل‌های مختلف، مدل برتر انتخاب شده و با نتایج حاصل از روش‌های کلاسیک مقایسه می‌شود. هدف از انجام این تحقیق بررسی دقت روش‌های کرنل محور ماشین بردار پشتیبان و فرایند رگرسیون گاوسی برای پیش‌بینی این پدیده است.

۲- مواد و روش‌ها

علاوه بر اهمیت گردآوری اطلاعات قابل اطمینان، به‌کارگیری روش‌های دقیق برای تخمین عمق آبشستگی نیز بسیار ضروری است. به‌همین دلیل در این مطالعه از دو روش رگرسیون فرآیند گاوسی و ماشین بردار پشتیبان که جزو روش‌های محاسباتی نرم می‌باشند و نسبت به سایر روش‌های گذشته نتایج بهتری ارائه می‌دهند، برای محاسبه عمق آبشستگی و بررسی این پدیده زیر خطوط لوله استفاده شده است.

۲-۱- ماشین بردار پشتیبان

ماشین‌های بردار پشتیبان (SVM)، در سال ۱۹۹۵ توسط Vapnik و Cortes معرفی شدند (Vapnik, ۱۹۹۵). از الگوریتم SVM در هر جایی که نیاز به تشخیص الگو یا دسته‌بندی اشیاء در کلاس‌های خاص باشد، می‌توان استفاده کرد. مبنای کاری دسته‌بندی کننده SVM دسته‌بندی خطی داده‌ها است و در تقسیم خطی داده‌ها سعی می‌شود که خطی انتخاب شود که حاشیه اطمینان بیشتری داشته باشد. در مسائلی که داده‌ها به‌صورت خطی جداپذیر نباشند، داده‌ها به فضای با ابعاد بیشتر نگاشت پیدا می‌کنند تا بتوان آن‌ها را در این فضای جدید به‌صورت خطی جدا نمود. با تکیه بر مفهوم بردار پشتیبان می‌توان از آن به‌عنوان ابزاری برای رگرسیون استفاده کرد (Roushangar و همکاران، ۲۰۱۷؛ Daneshfaraz و همکاران، ۲۰۲۱).

۲-۲- ویژگی‌های ماشین بردار پشتیبان

نحوه کارکرد الگوریتم SVM مانند اغلب روش‌های هوشمند به‌صورت آموزش و آزمون می‌باشد. ابتدا سیستم توسط قسمتی از داده‌ها آموزش داده می‌شود، سپس راه‌حل مسئله برای داده‌های

آبشستگی بزرگ‌تر می‌شود. حسینی و همکاران در سال ۱۳۸۴ با رسم نمودارهایی تأثیر پارامترهای مختلف را بر عمق آبشستگی در زیر خطوط لوله در حالت تعادل نسبی مورد ارزیابی قرار دادند. آن‌ها به نتایج زیر دست یافتند. در شرایط بستر فرسایشی، تأثیر پارامتر مقاومتی شیلدز، بر روی عمق آبشستگی ناچیز است. اما در حالت آب زلال تأثیر این پارامتر چشمگیر بوده و باید در نظر گرفته شود. عمق نسبی آبشستگی در حالت تعادل به‌صورت خطی نسبت به عدد فرود افزایش می‌یابد و جهت افزایش پتانسیل دفن خودبه-خودی خطوط لوله می‌توان تیغه نازکی با عرض مناسب به تاج آن اضافه نمود.

موسوی و همکاران (۱۳۸۵) پدیده آبشستگی اطراف خط لوله را مورد مطالعه قرار دادند و ثابت کردند که زبری بستر بر مقدار ماکسیمم عمق آبشستگی ناشی از جریان تأثیر ناچیزی دارد. Setia و Verma در سال ۲۰۰۷ مکانیسم آبشستگی زیر خطوط لوله را تحت شرایط مختلف جریان و لوله بررسی کردند و توسط تکنیک تزریق رنگ، جریان‌های گردابی مؤثر در آبشستگی را در دو طرف لوله مشاهده کردند. آن‌ها دریافتند که اولین علامت شروع آبشستگی در زیر لوله، پدیده پایپینگ است و عمق و طول حفره آبشستگی با افزایش قطر لوله، افزایش می‌یابد؛ درحالی‌که به عمق جریان وابسته نیست در این راستا رابطه‌ای را برای داده‌های آزمایشگاهی ارائه کردند. این پژوهشگران پارامتر اساسی مؤثر در عمق آبشستگی را فاصله بین لوله و بستر اولیه مطرح کردند و اظهار کردند که حداکثر عمق آبشستگی مربوط به حالت $e=D/4$ است.

Wu و Chiew (۲۰۱۰) تغییرهای مؤثر شامل فاصله اولیه لوله از بستر، عمق نرمال جریان، عدد فرود و پارامتر شیلدز را مورد مطالعه قرار دادند و نتیجه گرفتند که گسترش سه‌بعدی آبشستگی خط لوله را می‌توان به دو فاز سریع و کند تقسیم نمود. همچنین سرعت گسترش در شرایط آب صاف نسبت به عدد فرود بسیار حساس است ولی نسبت به پارامتر شیلدز این‌طور نیست.

در سال‌های اخیر روش‌های عددی و استفاده از نرم‌افزارها مورد استقبال قرار گرفته است. نجف‌زاده و سرکماریان در سال ۱۳۹۶ به بررسی تأثیر ۵ پارامتر بی‌بعد شده بر روی آبشستگی زیر خطوط لوله پرداختند. آن‌ها نشان دادند که روش EPR یا همان روش رگرسیون چند جمله‌ای تکاملی نسبت به روش‌های برنامه-ریزی بیان ژن (GEP) و مدل درخت (MT) نتایج بهتری داشته. Mathieu و همکارانش نیز در سال ۲۰۱۹ به بررسی عددی این پدیده در نرم‌افزار OpenFOAM پرداختند بیان کردند که تلاطم نقش مهمی بر آبشستگی دارد. Liu و همکارانش هم به کمک معادلات ناویر استوکس^۵ و مدل عددی پدیده آبشستگی زیر

باید مقدار بهینه را به خود اختصاص دهد. زیرا در شکل گیری تابع خروجی بسیار مؤثر می باشد.

۲-۴- فرآیند رگرسیون گاوسی

Carl Friedrich Gauss در قرن ۱۹ میلادی نمادگذاری توزیع گاوسی (توزیع نرمال) را پایه گذاری کرد، به همین خاطر این فرآیند به نام وی نمادگذاری شده است. تابع احتمال این توزیع دارای دو پارامتر است که یکی تعیین کننده مکان (μ) و دیگری تعیین کننده مقیاس (σ) توزیع هستند. فرآیند گاوسی را می توان به عنوان یک توزیع بی نهایت بعدی از گاوسی چند متغیره در نظر گرفت. در تئوری های احتمال و آمار، یک فرایند گاوسی به نوع خاصی از مدل آماری گفته می شود که در آن مشاهده ها در یک دامنه پیوسته قرار دارد. این فرآیند برای مدل کردن های آماری مفید است، زیرا از مزایای ذاتی توزیع نرمال استفاده می کند. فرآیند رگرسیون در واقع روش مدل سازی غیر پارامتری احتمالی را فراهم می کند که برای حل مسائل مختلف مهندسی به کار می رود.

فرآیندهای گاوسی شامل مجموعه ای از متغیرهای تصادفی می باشد که تعدادی از آن ها به صورت محدود و دلخواه با توزیع های گاوسی ترکیب شده اند. در GPR فرض بر این است که خروجی هر مدل مجموعه ای از داده، توزیع چند متغیره گاوسی دارد که کوواریانس آن توسط تابع کوواریانس مشخص می شود. با استفاده از کوواریانس بین داده های تست و تمامی داده های آموزش، می توان پیشگویی کرد و تابع توزیع خروجی تست را به دست آورد (Rasmussen, ۱۹۹۶).

اکثر مطالعه های انجام شده در پارامترهای آماری به صورت یک ترکیب خطی پیش بینی و سپس به ضرایب خطی تبدیل و تخمین زده می شوند. در صورتی که GPR پارامترهای ناشناخته را به عنوان ترکیب خطی از توابع غیر خطی بیان می کند. در واقع با یک تبدیل غیر خطی از فضای ورودی به فضای خصیصه با ابعاد بیشتر می توان مسائل را به صورت خطی تفکیک پذیر ساخت (ستاری و رضازاده جودی، ۱۳۹۴).

مجموعه داده S با n مشاهده را در نظر بگیرید $S = \{(x_i, y_i) | i=1, \dots, n\}$ که در آن بردار ورودی با D بعد و y_i خروجی هدف می باشد. این مجموعه متشکل از دو جزء ورودی و خروجی به عنوان نقاط نمونه یا تجربی معرفی خواهند شد. به منظور سهولت کار، ورودی های مجموعه در ماتریس $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ و خروجی ها نیز در ماتریس $Y = [y_1, y_2, \dots, y_n]$ تجمیع می گردند. وظیفه رگرسیون، ایجاد یک ورودی جدید x^* به منظور دستیابی به توزیع پیش بینی شده برای مقادیر متناظر داده های مشاهداتی y^* و بر مبنای مجموعه داده S می باشد. فرآیند گاوسی مجموعه ای از

آزمون مورد ارزیابی قرار می گیرد. مزیتی که SVM را نسبت به سایر الگوریتم ها مانند الگوریتم ژنتیک متمایز می سازد این است که این الگوریتم الگوریتمی مینی بر احتمالات نمی باشد و همواره جواب یکپایه به همراه دارد و زمان کمتری را برای دستیابی به جواب بهینه به خود اختصاص می دهد و آموزش آن نسبتاً آسان تر می باشد. البته نکته قابل ذکر این است که SVM و تابع کرنل آن دارای پارامترهای مختلفی می باشد که نحوه تنظیم آن ها در حصول جواب هرچه بهتر مسئله بسیار مؤثر می باشد. به همین علت یافتن بهینه ترین پارامترها نیز یک مسئله بهینه سازی می باشد که با روش سعی و خطا و بررسی مقادیر مختلف این پارامترها می تواند وقت گیر باشد. لذا این مسئله نیز باید به وسیله الگوریتم های بهینه سازی حل شود. همان طور که گفته شد SVM قادر است مسئله را به فضایی با ابعاد بیشتری انتقال دهد که این کار توسط ترفند کرنل صورت می گیرد. انتخاب نوع کرنل نسبت به شرایط و ماهیت مسئله متغیر می باشد و نمی توان تابعی را به طور قطعی به عنوان تابع مناسب برای SVM معرفی کرد (Roushangar و همکاران، ۲۰۱۷).

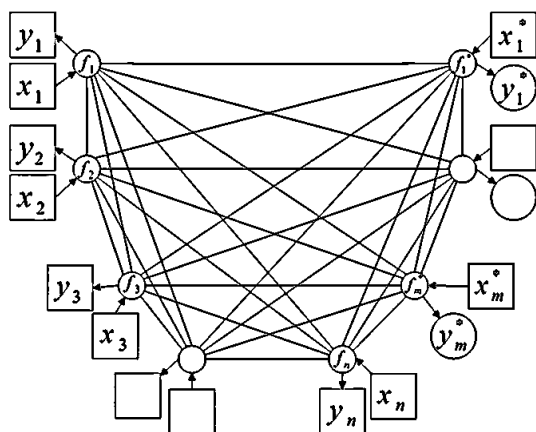
۲-۳- توابع کرنل

توابع کرنل شکل های مختلفی دارند و هر کدام می تواند با توجه به طبیعت مسئله، کاربرد خاص خودشان را داشته باشند. انواع مختلف تابع کرنل در جدول (۱) نشان داده شده است. (Koosheh و Roushangar, ۲۰۱۵).

جدول ۱- انواع توابع کرنل (Hofmann و همکاران، ۲۰۰۸)

تابع کرنل	رابطه
Linear	$K(x_i, x_j) = (x_i, x_j)$
Polynomial	$K(x_i, x_j) = ((x_i, x_j) + 1)^d$
RBF ϕ	$K(x_i, x_j) = \exp(-\frac{\ x_i - x_j\ ^2}{2\gamma^2})$
ERBF γ	$K(x_i, x_j) = \exp(-\frac{\ x_i - x_j\ }{2\gamma^2})$

در روابط فوق، منظور از عبارت (x_i, x_j) همان $x_i^T x_j$ می باشد. مقدار پارامتر d در توابع کرنل چند جمله ای باید از طریق آزمون و خطا و یا از طریق الگوریتم بهینه سازی به دست آید. توابع RBF و EBRF نوع دیگری از توابع کرنل می باشند که می توان گفت معروف ترین و پرکاربردترین توابع کرنل در مسائل ماشین بردار پشتیبان هستند (Norouzi و همکاران، ۲۰۱۹). این توابع معمولاً در مسائلی به کار گرفته می شوند که هیچ گونه پیش شناختی از نوع داده ها و طبیعت آن در اختیار نمی باشد. پارامتر σ در این توابع



شکل ۲- مدل تصویری رگرسیون فرآیند گاوسی
(روشنگر و همکاران، ۱۳۹۸)

۳- داده‌های مورد استفاده در تحقیق

در این پژوهش از داده‌های دو تحقیق Singh و Dey در سال ۲۰۰۸ و Moncada و همکاران در سال ۱۹۹۹ استفاده شده است که هر دو آزمایش‌هایی در فلوام^۸ مستطیلی و در حالت جریان یکنواخت انجام داده‌اند.

در پژوهش انجام شده توسط Singh و Dey (۲۰۰۸) نتایج تجربی برای توصیف تأثیر پارامترهای مختلف بر عمق آبشستگی تعادلی مورد بررسی قرار می‌گیرند. آزمایش‌ها در فلوام مستطیلی شیشه‌ای به طول ۱۲ متر با عرض ۰/۶۱ متر و عمق ۰/۷ متر در آزمایشگاه مهندسی منابع آب و هیدرولیک، مؤسسه فناوری هند، خراگپور^۹ انجام شد.

خطوط لوله که در کل فلوام کشیده شده‌اند ابتدا در تماس با خاک بستر می‌باشند. یک درب قابل تنظیم در پایین دست فلوام عمق جریان را کنترل می‌کند و برای جلوگیری از آبشستگی نامناسب فلوام از قبل با آب پر شده است و هنگامی که آب به عمق مورد نظر رسید آزمایشات با تنظیم تخلیه دلخواه انجام می‌شود.

در مرحله اولیه آبشستگی، هندسه سوراخ آبشستگی با گذشت زمان به سرعت شروع به تغییر کرد. هنگامی که تفاوت عمق آبشستگی در فاصله دو ساعت، ۱ میلی‌متر یا کمتر باشد آبشستگی تعادلی در نظر گرفته می‌شود که پس از ۶-۱۲ ساعت مشاهده شد. باین حال، کل مدت آزمایش برای دستیابی به تعادل ۱۶ ساعت بود. پس از آن حداکثر عمق آبشستگی در مرحله تعادل با استفاده از نقطه سنج ورنیه اندازه‌گیری شد که در نهایت ۱۲۶ سری داده از این پژوهش به دست آمد.

در تحقیق Moncada و همکاران آزمایش‌ها در یک کانال آزمایشگاهی مستطیلی به طول ۸/۵ متر با عرض و عمق ۵۰ سانتی‌متر و شیب ۰ تا ۳ درصد که ذرات بستر آن دو قطر متفاوت

متغیرهای تصادفی است که تعداد محدودی از آن‌ها با توزیع‌های گاوسی ادغام شده‌اند. فرآیند گاوسی تعمیمی از توزیع گاوسی می‌باشد. توزیع گاوسی درواقع توزیع بین متغیرهای تصادفی بوده درحالی که فرآیند گاوسی بیانگر توزیع بین توابع می‌باشد. فرآیند گاوسی $f(x)$ توسط توابع میانگین $m(x)$ و کوواریانس به شکل رابطه (۱) و (۲) تعریف می‌شود (Rasmussen, ۲۰۰۶).

$$m(x) = E(f(x)) \quad (1)$$

$$K(x, x') = E(f(x) - m(x))(f(x') - m(x')) \quad (2)$$

که در روابط فوق، $k(x, x')$ تابع کوواریانس (کرنل) بوده که در نقاط x و x' محاسبه می‌شود. فرآیند گاوسی $f(x)$ می‌تواند به صورت رابطه (۳) بیان گردد:

$$f(x) \sim GP(m(x), k(x, x')) \quad (3)$$

که معمولاً جهت ساده‌سازی، مقدار تابع میانگین برابر با صفر در نظر گرفته می‌شود. در فرآیند گاوسی، رابطه بین بردار ورودی و هدف به فرم رابطه (۴) می‌باشد:

$$y_i = (x_i) + \varepsilon \quad (4)$$

که در آن $f(x)$ بیانگر تابع رگرسیون دلخواه و ε نیز مقدار نویز توزیع گاوسی با میانگین صفر و واریانس σ^2 می‌باشد. یعنی $\varepsilon \sim N(0, \sigma^2)$ علاوه بر این، چنین فرض می‌گردد که $f = [f(x_1), f(x_2), \dots, f(x_n)]^T$ رفتاری بر مبنای فرآیند گاوسی داشته به نحوی که $p(f|X) = N(0, K)$ که در آن K ماتریس کوواریانس با درایه‌های $k_{ij} = k(x_i, x_j)$ می‌باشد (رابطه (۵)):

$$(X, X) = \begin{pmatrix} k(x_1, x_1) & k(x_1, x_2) & \dots & k(x_1, x_n) \\ k(x_2, x_1) & k(x_2, x_2) & \dots & k(x_2, x_n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ k(x_n, x_1) & k(x_n, x_2) & \dots & k(x_n, x_n) \end{pmatrix} \quad (5)$$

k_{ij} ، j کوواریانس بین مقادیر توابع نهان $f(x_i)$ و $f(x_j)$ می‌باشد. رگرسیون فرآیند گاوسی به منظور محاسبه توزیع پیش‌بینی شده برای مقادیر تابع f^* در نقاط تست $X^* = [x_1^*, x_2^*, \dots, x_m^*]$ به کار می‌رود. مدل تصویری فرآیند گاوسی در شکل (۲) ارائه شده است. در این شکل f_i بیانگر $f(x_i)$ می‌باشد. مجموعه توابع نهان f_i که با شاخص x_i نشان داده شده‌اند، به طور کامل به یکدیگر مرتبط می‌باشند. هر اتصال نشان‌دهنده یک رابطه بین دو متغیر نهان بوده که توسط تابع کوواریانس تعریف می‌شود (روشنگر، ۱۳۹۸).

جدول ۲- مدل‌های تعریف شده برای تخمین عمق آبشستگی

جریان یکنواخت	
پارامترهای ورودی	مدل
(h/D, D/d, Fr)	SF1
(h/D, D/d, Re)	SF2
(h/D, D/d, Fr, e/D)	SF3
(h/D, D/d, Re, e/D)	SF4
(h/D, D/d, Fr, S0)	SF5
(h/D, D/d, Re, S0)	SF6
(h/D, D/d, e/D, S0)	SF7

این مدل‌ها توسط روش‌های GPR و SVM پردازش شده‌اند. به منظور سنجش دقت مدل‌های استفاده شده در تخمین آبشستگی، لازم است قابلیت آن صحت‌سنجی گشته و خطاهای مدل مورد ارزیابی قرار گیرند. برای این منظور ضریب همبستگی^{۱۰} بین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی (R)، معیار ناش-ساتکلیف^{۱۱} (NSE) که یکی از معیارهای مهم ارزیابی قابلیت یک مدل است و ریشه میانگین مربعات خطاها ($RMSE$) که بیانگر میزان انحراف بین مقادیر پیش‌بینی شده می‌باشد مورد استفاده قرار می‌گیرند. روابط این پارامترهای آماری به صورت زیر می‌باشد:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2 \times \sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (7)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - Y_i)^2}{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2} \quad (8)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - Y_i)^2}{N}} \quad (9)$$

در روابط (۷) تا (۹)، X_i مقادیر مشاهداتی، Y_i مقادیر محاسباتی، $\bar{X}$ و $\bar{Y}$ به ترتیب بیانگر میانگین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی و N تعداد کل داده‌های موجود می‌باشد.

۴- صحت‌سنجی تابع کرنل

در استفاده از روش‌های GPR و SVM جهت انتخاب تابع کرنل مناسب با استفاده از یکی از مدل‌ها و پردازش آن توسط تمامی توابع کرنل همان‌طور که در جدول (۳) آمده مشاهده شد که به-ازای مقادیر ثابت γ ، تابع کرنل RBF بهتر عمل کرده همچنین برای یافتن بهینه‌ترین پارامتر تابع کرنل (γ) و مقادیر پارامتر جریمه (c) و حداکثر حاشیه اطمینان (E) از روش سعی و خطا استفاده می-گردد و با آزمودن مقادیر مختلف، مقدار بهینه این پارامترها انتخاب گردید.

بودند و لوله‌هایی با چهار اندازه مختلف که در بالای بستر و یا بر روی آن قرار داشتند انجام شد.

دبی جریان (Q) توسط یک سرریز کالیبره شده در پایین‌دست جریان قبلاً اندازه‌گیری شده. در اولین مجموعه آزمایشات، برای $d_{50}=1.80$ میلی‌متر، خطوط لوله در تماس با بستر کانال قرار گرفتند و از چهار لوله متفاوت استفاده و ۳۰ آزمایش انجام شد. در مجموعه دوم آزمایشات، خطوط لوله بالای بستر قرار گرفتند. فاصله بین خط لوله و بستر کانال بین ۰/۵ تا ۰/۲ سانتی-متر متغیر است. سپس پانزده آزمایش انجام شد. پی از آن هر دو سری آزمایش‌ها برای $d_{50}=0.72$ انجام شد که در آخر ۹۰ سری داده نیز از این آزمایش‌ها به دست آمد. در مجموع از ۲۱۶ داده به دست آمده از این پژوهش‌ها، که در جداولی در هر دو مقاله آورده شده، برای این مطالعه استفاده شد.

یکی از مراحل پیش‌پردازش داده‌ها، نرمال‌سازی آن‌ها می‌باشد که در صورت اعمال آن بر روی ورودی‌ها و هدف می‌تواند کارایی بالاتری داشته باشد. نرمال کردن داده‌ها به خصوص زمانی که دامنه تغییرات ورودی‌ها زیاد باشد، کمک شایانی به آموزش بهتر و سریع‌تر مدل می‌کند. روش استفاده شده برای پیش‌پردازش داده‌ها به شرح زیر است.

$$x_n = \alpha + \beta \times \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad (5)$$

در این رابطه α برابر با صفر و β برابر یک در نظر گرفته شده است. همچنین x_{max} و x_{min} به ترتیب کم‌ترین و بیش‌ترین مقدار داده و x_n داده نرمال شده می‌باشد. تعیین و انتخاب پارامترهای ورودی تأثیر بالایی در دقت نتایج به دست آمده دارند. با توجه به پارامترهای اندازه‌گیری شده در آزمایش‌ها در این بخش پارامترهای بدون بعد تأثیرگذار و مناسب در محاسبه عمق آبشستگی تعادلی معرفی شده و ترکیب‌های مختلفی از این پارامترها برای تخمین عمق آبشستگی تعریف شده که می‌توان به صورت رابطه زیر بیان کرد:

$$\frac{S}{D} = f(h/D, D/d, Re, Fr, S_0, e/D) \quad (6)$$

که در آن S عمق تعادلی آبشستگی، D قطر لوله، h ارتفاع جریان، d اندازه ذرات بستر، Re عدد رینولدز، Fr عدد فرود، S_0 شیب بستر و e فاصله اولیه لوله از بستر می‌باشد. تعداد ۷ مدل تعریف شد که در تمامی آن‌ها عمق آبشستگی تعادلی و قطر لوله به عنوان خروجی بی‌بعد در نظر گرفته شده است. همچنین پارامترهای تأثیرگذاری به صورت بی‌بعد به عنوان ورودی در نظر گرفته شده است که در هر مدل تعدادی از آن‌ها مورد بررسی قرار گرفتند. در جدول (۲) می‌توان ورودی‌ها و ترکیب آن‌ها را برای هر مدل مشاهده نمود.

کل ناچیز و یا به مقدار اندکی باعث بهبود نتیجه شده است. البته در داده‌های مورد استفاده در این تحقیق بازه تغییرات پارامتر شیب کم بوده و در اکثر آزمایش‌ها صفر در نظر گرفته شده است. البته مدل‌هایی که در آن‌ها خروجی صرفاً توسط یک پارامتر ورودی بی‌بعد شده مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند نیز پردازش شده‌اند که به دلیل این که نتایج قابل قبول نداشته‌اند در جداول مطرح نشدند. با توجه نتایج صحت‌سنجی مدل‌ها این نتایج را می‌توان به صورت نمودارهای پراکندگی نیز بیان کرد. در این نمودارها به راحتی می‌توان نزدیک بودن مقدار پیش‌بینی شده آبشستگی را به مقدار به دست آمده در آزمایش‌ها مشاهده کرد. همان‌طور که در نمودارها و جداول مشخص می‌باشد نتایج هر دو روش GPR و SVM نزدیک به هم می‌باشند ولی نتایج روش ماشین بردار پشتیبان دقت بهتری داشته و مدل SF6 با داشتن ضریب R برابر ۰/۸۷۷ و ضریب NSE برابر ۰/۷۶۷ و RMSE برابر ۰/۰۸۴ بهترین نتیجه را دارا می‌باشد که در آن‌ها ضریب همبستگی و معیار ناش-ساتکلیف نزدیک‌ترین به عدد یک و ریشه میانگین مربعات خطا آن نزدیک‌ترین به صفر می‌باشد.

به منظور مقایسه بهتر مدل دیگری به عنوان SF8 در نظر گرفته شد که شامل دو پارامتر $h/D, D/d$ بوده و بدون در نظر گرفتن سرعت جریان است. به دلیل بهتر بودن نتیجه‌های روش SVM فقط نتایج حاصل از ارزیابی روش ماشین بردار پشتیبان در جدول (۷) به صورت جداگانه آورده شده. با توجه به نتایج حاصل از آن می‌توان بیان کرد که سرعت جریان تأثیر بسزایی در پیش‌بینی بهتر فرایند آبشستگی در زیر خطوط لوله دارد.

جدول ۵- نتایج حاصل از مدل‌سازی پدیده آبشستگی زیر خط لوله به روش ماشین بردار پشتیبان

مدل	آموزش			صحت‌سنجی		
	RMSE	NSE	R	RMSE	NSE	R
SF1	۰/۰۹۳	۰/۷۲۰	۰/۸۴۹	۰/۰۹۴	۰/۸۱۰	۰/۹۰۱
SF2	۰/۰۸۷	۰/۷۵۳	۰/۸۶۹	۰/۰۹۱	۰/۸۲۳	۰/۹۰۸
SF3	۰/۰۹۲	۰/۷۲۰	۰/۸۵۲	۰/۰۷۱	۰/۸۹۳	۰/۹۴۸
SF4	۰/۰۹۲	۰/۷۲۲	۰/۸۵۴	۰/۰۷۲	۰/۸۹۰	۰/۹۴۴
SF5	۰/۰۹۲	۰/۷۲۵	۰/۸۵۴	۰/۱۰۶	۰/۸۷۱	۰/۹۳۵
SF6	۰/۰۸۴	۰/۷۶۷	۰/۸۷۷	۰/۰۷۵	۰/۸۸۰	۰/۹۳۹
SF7	۰/۰۹۰	۰/۷۳۵	۰/۸۵۹	۰/۱۱۴	۰/۸۳۰	۰/۹۱۲

جدول ۳- نتایج به دست آمده از ماشین بردار پشتیبان با

استفاده از توابع کرنل مختلف برای مدل SF6

تابع	آموزش			صحت‌سنجی		
	RMSE	NSE	R	RMSE	NSE	R
RBF	۰/۹۳۹	۰/۸۸۰	۰/۰۷۵	۰/۸۷۷	۰/۷۶۷	۰/۰۸۴
Linear	۰/۷۵۸	۰/۵۳۰	۰/۰۹۸	۰/۷۳۷	۰/۴۹۰	۰/۱۲۵
Polynomial	۰/۸۷۲	۰/۸۳۴	۰/۰۸۳	۰/۸۵۶	۰/۷۰۲	۰/۰۹۵
Sigmoid	۰/۴۷۱	۰/۰۷۲	۰/۱۴۲	۰/۴۶۲	۰/۰۹۶	۰/۱۸۳

۵- نتایج و بحث

پس از تعیین پارامترهای ورودی فرایند مدل‌سازی عمق آبشستگی زیر خط لوله و مشخص شدن نوع تابع کرنل، داده‌ها مورد ارزیابی قرار گرفتند. بدین منظور از نرم‌افزار STATISTICA برای روش ماشین بردار پشتیبان و نرم‌افزار WEKA برای روش رگرسیون فرایند گوسی استفاده شد. تنظیمات و مقدار پارامترهای مورد استفاده در روش‌های کرنلی در هر دو روش ماشین بردار پشتیبان و رگرسیون فرایند گوسی به صورت سعی و خطا بهینه شد که بازه تغییرات این پارامترها در جدول (۴) نشان داده شده است. در ارزیابی نهایی نتایج حاصل از دو روش ماشین بردار پشتیبان و روش رگرسیون فرایند گاوسی در جداول (۵) و (۶) ارائه شده است.

جدول ۴- بازه تغییرات پارامترهای روش‌های ماشین بردار

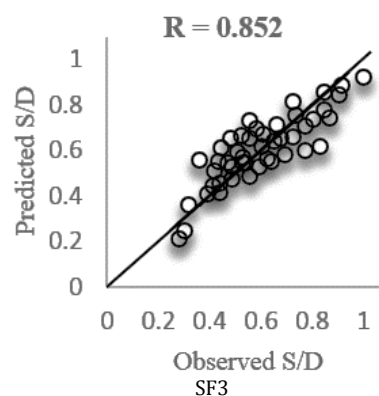
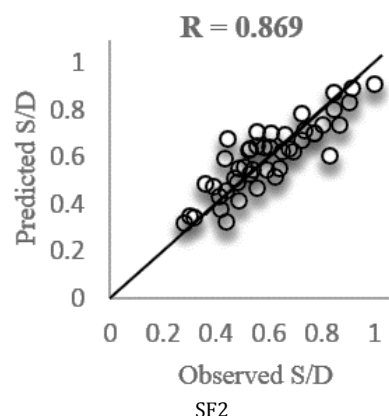
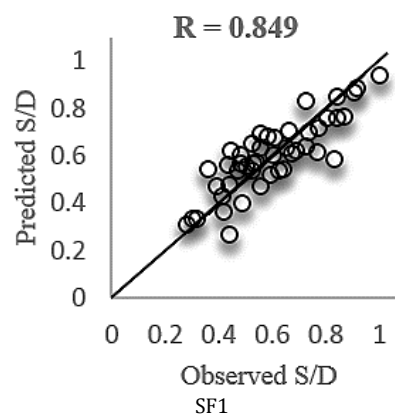
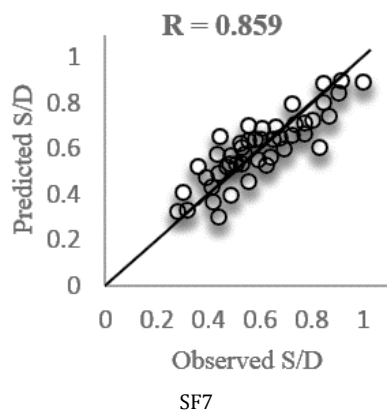
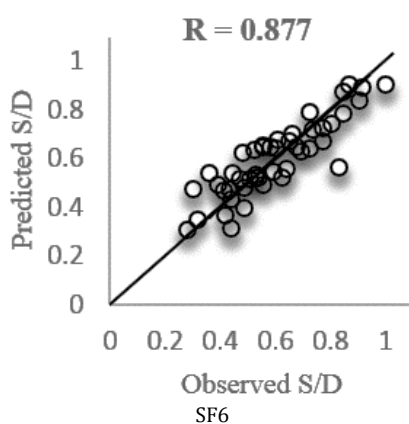
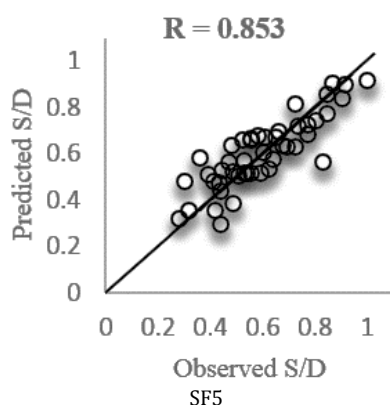
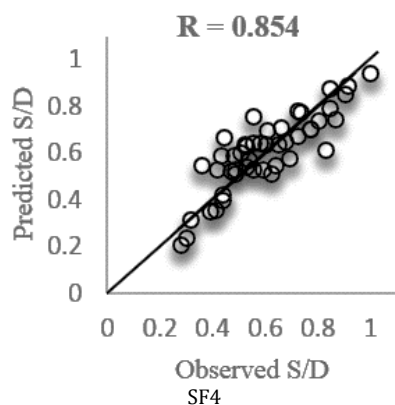
پشتیبان و رگرسیون فرایند گاوسی

روش	بازه تغییرات پارامترها	
	گاما	نویز
ماشین بردار پشتیبان	۵ - ۱۳	-
رگرسیون فرایند گاوسی	۱۰ - ۳۰	۰/۷ - ۰/۲

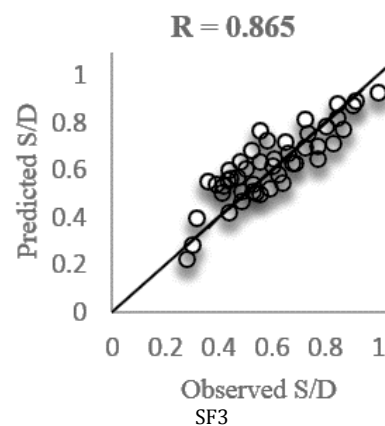
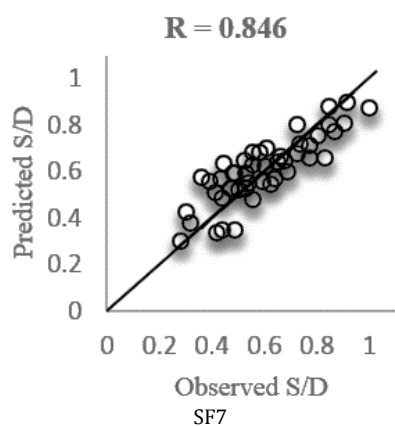
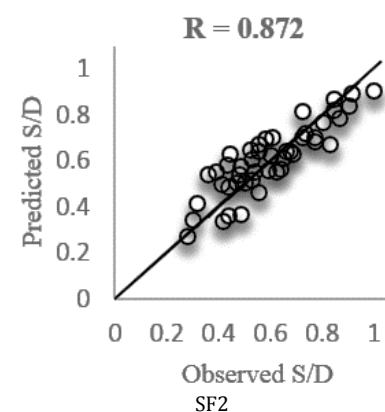
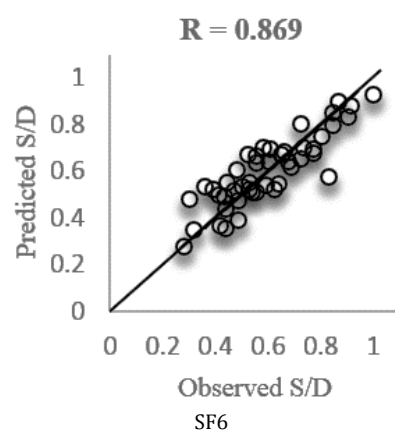
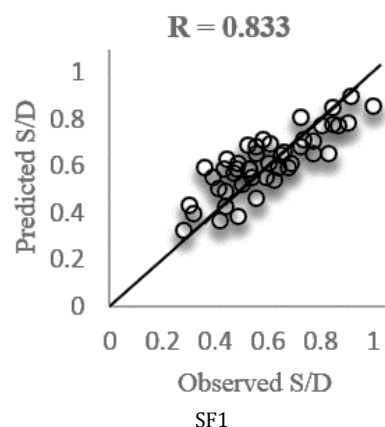
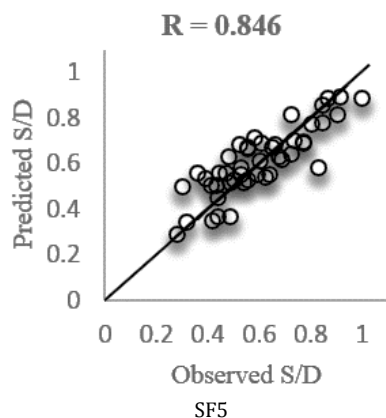
با توجه به نتایج به دست آمده و مقایسه آن‌ها می‌توان اشاره کرد که به نظر می‌رسد پارامتر رینولدز (که در مدل‌های ۱، ۳ و ۵ مورد بررسی قرار گرفته) نسبت به عدد فرود (که در مدل‌های ۲، ۴ و ۶ مورد بررسی قرار گرفته) تأثیر بیشتری بر فرایند آبشستگی زیر خطوط لوله داشته و نتایج بهتری حاصل شده چنانچه می‌توان مشاهده کرد که در مدل‌هایی که در آن‌ها پارامتر رینولدز مورد بررسی قرار گرفته نتایج نزدیک‌تر به واقعیت بوده و پارامترهای ارزیابی آن جواب بهتری نسبت به مدل‌هایی که به بررسی تأثیر عدد فرود داشته‌اند، دارا بوده است. همچنین با مقایسه دو به دو مدل‌های ۱ و ۵ و همین‌طور ۲ و ۶ می‌توان اظهار کرد که تأثیر پارامتر S_0 بر روی این پدیده مشهود نبوده به‌طوری‌که با مقایسه مدل‌ها می‌توان به این جمع‌بندی رسید که تأثیر این پارامتر در

جدول ۶- نتایج حاصل از مدل سازی پدیده آبخستگی زیر خط لوله برای به روش رگرسیون فرآیند گاوسی

مدل	آموزش			صحت سنجی		
	RMSE	NSE	R	RMSE	NSE	R
SF1	۰/۹۲۸	۰/۸۵۰	۰/۰۸۴	۰/۸۳۳	۰/۶۷۱	۰/۱۰۰
SF2	۰/۹۴۲	۰/۸۸۴	۰/۰۷۴	۰/۸۷۲	۰/۷۵۴	۰/۰۸۷
SF3	۰/۹۷۹	۰/۹۵۷	۰/۰۴۵	۰/۸۶۵	۰/۷۲۱	۰/۰۹۲
SF4	۰/۹۶۶	۰/۹۳۲	۰/۰۵۶	۰/۸۶۸	۰/۷۳۱	۰/۰۹۱
SF5	۰/۹۳۷	۰/۸۷۰	۰/۰۷۸	۰/۸۴۶	۰/۷۰۹	۰/۰۹۴
SF6	۰/۹۴۷	۰/۸۹۳	۰/۰۷۱	۰/۸۶۹	۰/۷۵۳	۰/۰۸۷
SF7	۰/۹۳۷	۰/۸۷۰	۰/۰۷۸	۰/۸۴۶	۰/۷۰۶	۰/۰۹۵



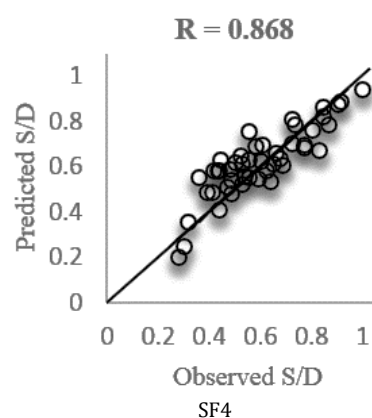
شکل ۳- نمودارهای نتایج حاصل از مدل سازی پدیده آبخستگی زیر خط لوله به روش ماشین بردار پشتیبان



شکل ۴- نمودارهای نتایج حاصل از مدل سازی پدیده
آبشستگی زیر خط لوله به روش رگرسیون فرآیند گاوسی

جدول ۷- نتایج حاصل از مدل سازی پدیده آبشستگی زیر خط
لوله برای به روش ماشین بردار پشتیبان

مدل	آموزش			صحت سنجی		
	RMSE	NSE	R	RMSE	NSE	R
SF8	۰/۷۹۴	۰/۶۲۸	۰/۱۵۰	۰/۵۲۴	۰/۲۰۱	۰/۱۵۶

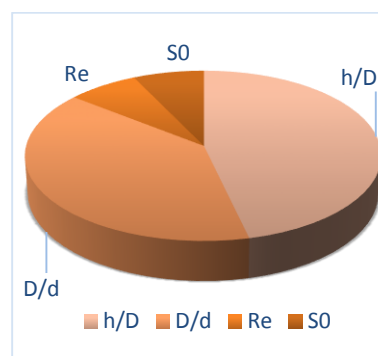


۵-۱- آنالیز حساسیت مدل برتر

با انتخاب مدل SF6 به عنوان مدل برتر و مدلی که بهترین نتایج را ارائه داد به جهت بررسی تأثیر پارامترهای مختلف در تخمین آبشستگی و انتخاب تأثیرگذارترین پارامتر از آنالیز حساسیت استفاده شده است. در این آنالیز با حذف پارامترهای مدل برتر و اجرای مجدد مدل با استفاده از ماشین بردار پشتیبان و محاسبه معیارهای ارزیابی مدل، میزان تأثیر پارامترهای حذف شده مورد بررسی قرار می گیرد. با توجه به این نتایج مشاهده می گردد که پارامترهای h/D و D/d به ترتیب در برآورد عمق آبشستگی زیر خط لوله تأثیرگذاری بیشتری دارند. جدول (۸) نشان دهنده میزان تأثیر پارامترهای موجود در مدل برتر است و همچنین به طور شماتیک می توان در شکل (۵) مشاهده کرد.

جدول ۸- نتایج حاصل از آنالیز حساسیت پارامترها در مدل

مدل	R	NSE	RMSE	پارامتر حذف شده
SF6	۰/۸۷۷	۰/۷۶۷	۰/۰۸۴	-
SF6-1	۰/۸۶۸	۰/۷۴۳	۰/۰۸۶	S0
SF6-2	۰/۸۷۰	۰/۷۴۳	۰/۰۸۹	Re
SF6-3	۰/۸۳۶	۰/۶۳۳	۰/۱۰۶	D/d
SF6-4	۰/۹۲۴	۰/۶۱۲	۰/۱۰۸	h/D



شکل ۵- نمودار میزان تأثیر پارامترها در مدل برتر

۵-۲- نتایج حاصل از روابط کلاسیک برای برآورد عمق آبشستگی

به منظور مقایسه نتایج به دست آمده با روابط کلاسیک مرسوم، از سه رابطه به دست آمده توسط برهمند و جاعل (۱۳۸۶)؛ نیکنیا و کشاورز (۱۳۸۸) و Verma و Setia (۲۰۰۷) استفاده شده که نتایج آن در جدول (۹) آمده است. با توجه به نتایج به دست آمده از این مقایسه، رابطه نیکنیا و کشاورز جواب قابل قبولی داشته اما دو رابطه دیگر دارای نتایج قابل قبول نمی باشند.

جدول ۹- مقایسه نتایج به دست آمده از سه روش کلاسیک

رابطه	R	NSE	RMSE	معیارهای صحت سنجی
برهمند و جاعل (۱۳۸۶)	۰/۶۴۶	-۰/۴۵۵	۰/۲۸۵	
نیکنیا و کشاورز (۱۳۸۸)	۰/۸۶۶	۰/۷۴۴	۰/۱۲۰	
Verma و Setia (۲۰۰۷)	۰/۴۹۹	-۲/۹۱۵	۰/۶۷۹	
روشنگر و همکاران (۱۴۰۰)	۰/۸۷۷	۰/۷۶۷	۰/۰۸۴	

۶- نتیجه گیری

در مطالعه انجام شده از ۲۱۶ داده تحت جریان یکنواخت منظور ارزیابی و تخمین عمق تعادلی آبشستگی زیر خط لوله استفاده گردید. برای تمامی مدل سازی های مذکور، از ترکیب پارامترهای بدون بعد استفاده شده و تأثیر پارامترهای وابسته به مشخصات جریان مورد ارزیابی قرار گرفت. مقایسه تعدادی از روابط تجربی با نتایج حاصل از روش های SVM و GPR نشان داد که روش های هوش مصنوعی نسبت به روابط کلاسیک ذکر شده در این تحقیق بسیار دقیق تر و قابل اعتمادتر می باشند. همچنین بررسی نتایج به دست آمده بیانگر آن است که نتایج هر دو روش نزدیک به هم بوده و با اختلاف اندکی روش SVM جواب های بهتری ارائه می دهد. کیفیت داده ها و تعداد آن ها تأثیر بسزایی بر روی دقت نتایج داشته و توصیه می شود در تحقیقات آتی از داده های بیشتری استفاده شود. با مقایسه حالت های مختلف بررسی شده در این تحقیق، نتایج زیر را می توان استنتاج نمود:

- برای داده های آزمایشگاهی تحت جریان یکنواخت بررسی حالت های مختلف نشان داد، مدل با پارامترهای ورودی h/D ، D/d ، Re و $S0$ با دارا بودن مقادیر معیارهای ارزیابی $RMSE$ برابر $۰/۰۸۴$ ، R برابر $۰/۸۷۷$ و NSE برابر $۰/۷۶۷$ به عنوان مدل برتر انتخاب شده و نسبت به سایر مدل ها در تخمین عمق آبشستگی زیر خطوط لوله منجر به نتایج دقیق تری می گردد. لذا مدلی که تنها یک پارامتر ورودی داشتند نتایج قابل قبولی ارائه ندادند به همین جهت در جداول آورده نشدند.
- با انجام آنالیز حساسیت بر روی مدل برتر، مشاهده شد که پارامترهای h/D و D/d نقش اساسی در تخمین عمق آبشستگی زیر خطوط لوله تحت جریان یکنواخت ایفا می نمایند. اما به تنهایی نمی توانند نتایج قابل قبولی برای بررسی و پیش بینی آن پدیده ارائه دهند.
- با توجه به مقایسه نتایج دو گروه از مدل ها (مدل های ۱، ۳ و ۵ با مدل های ۲، ۴ و ۶) می توان مشاهده کرد که تأثیر عدد رینولدز بر عمق آبشستگی بیشتر از عدد فرود می باشد.

غزل ا، منتصری م، "ارزیابی معادلات عمق آبستنگی موضعی در رودخانه‌ها"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه ارومیه، ۱۳۸۸.

موسوی م، یگانه بختیاری ع، انشایی ن، "پیش‌بینی عمق آبستنگی اطراف لوله‌های زیردریایی تحت اثر جریان"، هفتمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، ۱۳۸۵.

نیک‌نیا ن، کشاورزی ع، "بررسی عمق آبستنگی زیر خطوط لوله در کانال مرکب با شرایط بستر فرسایشی"، هشتمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه، ۱۳۸۸.

Ažman K, Kocijan J, "Application of gaussian processes for black-box modelling of biosystems", ISA Transactions, 2007, 46, 443-457.

Azamathulla H, Md Yusoff MAM, Hasan ZA "Scour below submerged skewed pipeline", Journal of Hydrology 2014, 509, 615-620.

Bijker EW, Leeuwestein W, "Interaction between pipelines and the seabed under the influence of waves and currents", Seabed Mechanics, 1984, 235-242.

Chiew YM, "Flow around horizontal circular cylinder in shallow flows", Journal of Waterway, Port, Coast and Ocean Engineering, ASCE, 1991, 117 (2), 120-135.

Chiew YM, "Mechanics of local scour around submarine pipeline", Journal Hydraulic Engineering, ASCE, 1990, 116 (4), 515-529.

Chiew YM, "Prediction of maximum scour depth at submarine pipelines", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1991, 117 (4), 452-466.

Chiew YM, "Prediction of maximum scour depth at submarine pipelines", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1991, 117 (4), 452-466.

Daneshfaraz R, Bagherzadeh M, Esmaeeli R, Norouzi R, Abraham J, "Study of the performance of support vector machine for predicting vertical drop hydraulic parameters in the presence of dual horizontal screens", Water Supply, 2021, 21 (1), 217-231.

Dey S, Singh NP, "Clear-water scour below underwater pipelines under steady flow", Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 134 (5).

Hofmann T, Schölkopf B, Smola Alexander J, "Kernel methods in machine learning", The Annals of Statistics, 2008, 36 (3), 1171-1220.

Ibrahim A, Nalluri C, "Scour prediction around marine pipelines", International Offshore Mechanics and Arctic Engineering Symposium, 1986, 5, 679-684.

Jensen BL, Sumer BM, Jensen HR, Fredsoe J, "Flow around and forces on a pipeline near a scoured bed in steady current", Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 1990, 112 (3), 206-213.

Kjeldsen SP, Gjorsvik O, Bringaker KG, Jacobsen J, "Local scour near offshore pipelines", 2nd Int. Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, Conf. Reykjavik, 1973, 308-331.

Liu M, Jin X, Wang L, Yang F, Tang J, "Numerical investigation of local scour around a vibrating pipeline under steady currents", Ocean Engineering, 2021, 221, 108546.

• به دلیل عدم بررسی دقیق شیب طولی در آزمایش‌ها تأثیر آن بر پدیده آبستنگی زیر خطوط لوله به طور دقیق قابل مشاهده نبود.

• در استفاده از روش ماشین بردار پشتیبان و فرآیند رگرسیون گاوسی از بین توابع کرنل مختلف، تابع کرنل RBF بهترین نتایج را در تخمین عمق آبستنگی زیر خطوط لوله ارائه می‌دهد. لازم به ذکر است که تابع کرنل Sigmoid بدترین نتایج را ارائه داد.

• با توجه به نتایج به دست آمده در این پژوهش، مشخص می‌شود که روش‌های SVM و GPR روش‌های قابل اطمینان با نتایج قابل قبول برای تخمین عمق آبستنگی زیر خطوط لوله می‌باشند.

با کمک روش‌های نوین تر عددی و همچنین استفاده از نرم افزارهای مدل سازی بررسی این پدیده دقیق تر گشته و می توان پارامترهای بیشتری را نیز مورد بررسی قرار داد. همان طور که گفته شد می توان تأثیر شیب طولی را بیشتر مورد مطالعه قرار داد. همچنین بررسی آبستنگی زیر خطوط لوله در زانویی ها و خم ها نیز موضوعی است که کم تر به آن پرداخته شده است. عموماً آزمایشات در فلوم های آزمایشگاهی با بستر ماسه ای بودند و بهتر است بسترهای دیگر نیز مورد بررسی و آزمایش قرار بگیرد همچنین در مطالعات، بر اثر عرض محدوده فلوم و تأثیر آن پرداخته نشده.

۷- مراجع

برهمند ن، جاعل آ، "تخمین آبستنگی در زیر خطوط لوله عبوری از مقطع عرضی رودخانه‌ها"، ششمین کنفرانس هیدرولیک ایران، ۱۳۸۶.

بیات ح، "اندرکنش سازه های آبی و فرسایش"، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ۱۳۷۹، ۱۷۲-۲۰۵.

حسینی د، حکیم زاده ح، غیائی ر، "بررسی پدیده آبستنگی موضعی در اطراف خطوط لوله فراساحلی تحت اثر جریان های ماندگار با استفاده از مدل فیزیکی"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه سهند، تبریز، ۱۳۸۴.

ستاری م ت، رضازاده جودی ع، "تخمین عمق چاله آبستنگی پایه پل در سازه های آبی با روش رگرسیون فرآیند گاوسی"، مجله تحقیقات کاربردی مهندسی سازه های آبیاری و زهکشی، ۱۳۹۴، ۱۶ (۶۵)، ۳۶-۱۹.

شفاعی بجستان م، "هیدرولیک رسوب"، انتشارات دانشگاه شهید چمران، اهواز، ۱۳۷۸.

- Mathieu A, Chauchat J, Bonamy C, Nagel T, "Two-phase flow simulation of tunnel and lee-wake erosion of scour below a submarine pipeline", *Water*, 2019, 11 (8), 1727.
- Maza JA, "Introduction to river engineering", Advanced Course on Water Resources Management, Università Italiana per Stranieri, Perugia, Italy, 1987.
- Moncada-M AT, Aguirre-Pe J, "Scour below pipeline in river crossings", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 1999, 125 (9), 953-958.
- Najafzadeh M, Sarkamaryan S, "Extraction of optimal equations for evaluation of pipeline scour depth due to currents", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Maritime Engineering*, 2018, 1-34.
- Norouzi R, Daneshfaraz R, Ghaderi A, "Investigation of discharge coefficient of trapezoidal labyrinth weirs using artificial neural networks and support vector machines", *Applied Water Science*, 2019, 9 (7), 148.
- Rasmussen CE, "Evaluation of Gaussian processes and other methods for non-linear regression", Thesis of Doctor of Philosophy, Graduate Department of Computer Science, University of Toronto, 1996, 2861-2861.
- Roushangar K, Alami M, Majedi Asl M, "Determination of labyrinth and arced labyrinth weirs discharge coefficients using support vector regression", *Water and Soil Science*, 2017, 27 (1), 173-186. Available from: https://water-soil.tabrizu.ac.ir/article_6223_b3bfc9fd67c4ee0fb5d2dda843332cfa.pdf
- Roushangar K, Koosheh A, "Evaluation of GA-SVR method for modeling bed load transport in gravel-bed rivers", *Journal of Hydrology*, 2015 527, 1142-1152.
- Roushangar K, Ghasempour R, Saghebian SM, "Comparative study of effective hydraulic parameters on bridge piers scouring in cohesive and grainy soils using gaussian process regression method", *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 2019, 1475-1485.
- Setia B, Verma D, "Physics of flow mechanism of scour around submerged pipelines on an erodible bed", 3rd WSEAS International Conference on Applied and Theoretical Mechanics, Spain, 2007.
- Sumer BM, Jensen HR, Mao Y, Fredsoe J, "Effect of lee-wake on scour below pipelines in current", *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 1988, 114 (5).
- Sumer BM, Fredsoe J, "Scour below pipelines in waves", *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 1990, 116 (3).
- Vapnik V, "The nature of statistical learning", Theory Springer-Verlag, New York, NY, 1995, 286.
- Wu Y, Chiew YM, "Three-dimentional scour at submarine pipelines in unidirectional steady", *Proceedings 5th International Conference on Scour and Erosion*, San Francisco, USA, American Society of Civil Engineers, 2010, 471-481.
- Zhang Q, Draper S, Cheng L, An H, "Scour below a subsea pipeline in time varying flow conditions", *Applied Ocean Research*, 2016, 55, 151-162.

EXTENDED ABSTRACT

Modeling and Predicting the Rate of Scour Depth below Pipelines Using Kernel-Based Methods for Steady Flows

Kiyoumars Roushangar ^{a,*}, Shima Shafie Naeibi ^a, Mohammad Ali Lotfollahi-Yaghin ^a, Mehrdad Ramazanilar ^b

^a Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz 5166616471, Iran

^b Faculty of Mechanic Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran 1969764499, Iran

Received: 29 November 2021; **Accepted:** 21 February 2022

Keywords:

Scour depth, Pipelines, Steady flow, Kernel-Based Method, Gaussian process regression (GPR), Support vector machine (SVM).

1. Introduction

Pipelines are used all around the world to transport fluids from one location to another. When these pipelines meet rivers, seas and oceans pipes are laid on the solid bed and it causes changes in the flow pattern around the pipes. In result of these changes, the shear stress of bed under pipelines and turbulence of current will be increased, and scour will occur under pipelines and the scour hole will form and develop. These holes cause damage and failure to the pipe due to the pipe weight. In case of failure of the pipe, irreparable damages will incur to the environment and there will be huge financial costs. Therefore, it is very important to study the scour depth and effective variables to reduce scour and prevent damages. Researchers have conducted experimental and numerical studies on scour phenomenon and have provided relations over the years.

In this research the effect of various factors on this phenomenon in steady current are investigated using Gaussian process regression (GPR) and support vector machine (SVM) and it is compared with the previous presented relations. To this end several laboratory data were used and after defining several non-dimensional parameters the performance of these methods was evaluated. The result of this research demonstrated that these methods are better than experimental relations and have promising outcomes. This study have shown that an SVM model with h/D , D/d , Re and S_0 variables in steady current have the best results. It is worth mentioning that h and variables in steady current have the most significant effect on the scour below pipelines.

2. Support vector machine and Gaussian process regression

In addition to the importance of gathering reliable information, it is essential to use accurate methods to estimate scour depth. Therefore, in this study, two powerful methods of Gaussian process regression and support vector machine, which are among the soft computational, used to calculate the scour depth and study this phenomenon. How the SVM algorithms work is similar to most intelligent methods, by training and testing. The system is first trained by a portion of the data, then the problem solution for the test data is evaluated. SVM is able to move the problem to a more dimensional space, which is done by kernel methods. According to the circumstances and the problem different type of kernels can be chosen. In this study we used the RBF kernel which gave the best result among others. The Gaussian process can be considered as an infinite dimensional distribution of multivariate Gaussian. The regression process actually provides a possible non-parametric modeling method that is used to solve various engineering problems.

* Corresponding Author

E-mail addresses: roshangari@tabrizu.ac.ir (Kiyoumars Roushangar), shafi.sh94@gmail.com (Shima Shafie Naeibi), lotfollahi@tabrizu.ac.ir (Mohammad Ali Lotfollahi-Yaghin), mehrdad.ramazanilar@gmail.com (Mehrdad Ramazanilar).

The data of experiments in a rectangular flume and in a steady current, from two research conducted by Dey and Singh (2008), and Moncada et al. (1999) are used in this study.

3. Modeling and predicting the scour depth

According to the parameters measured in the experiments, non-dimensional parameters are defined and a combination of these criteria is introduced to estimate the scour depth, which can be expressed in the following relation.

$$\frac{S}{D} = f(h/D, D/d, Re, Fr, S_0, e/D) \quad (1)$$

Where S is the equilibrium depth of scour, D is the pipe diameter, h is the height of the flow, d is the diameter of bed material, Re is the Reynolds number, Fr is the Froude number, S_0 is bed longitudinal slope; and e is the initial distance between pipe and bed.

Numerous models were processed by SVM and GPR methods and R , NSE and $RMSE$ coefficient were used to evaluate these models. The best results were obtained from a model with following parameters:

$$SF6 \quad (h/D, D/d, Re, Fr, S_0) \quad (2)$$

Afterwards the obtained results were compared with results of 3 function presented by the previous researchers, and it is shown that better and more accurate results can be achieved utilizing methods introduced in this study. By selecting the SF6 model as a model that provided the best results, sensitivity analysis has been used to investigate the effect of different parameters in predicting the rate of scour depth under pipelines and to select the most effective parameter.

4. Conclusions

In this research, using experimental data in steady flow showed that the model with input parameters of h/D , D/d , Re and S_0 with the values of $RMSE=0.084$, $R=0.877$ And $NSE=0.767$ is selected as the superior model and leads to more accurate results in estimating the scour depth below the pipelines than other models.

By performing sensitivity analysis on the superior model, it was observed that h/D and D/d parameters play an essential role in estimating the scour depth under pipelines under uniform flow. However, they alone cannot provide acceptable results for the study and prediction of that phenomenon. According to the comparison of the results obtained from these models, it can be concluded that the effect of Reynolds number on scour depth is more than the Froude number.

5. References

- Dey S, Singh NP, "Clear-Water Scour below Underwater Pipelines under Steady Flow", Journal of Hydraulic Engineering, 2008.
- Moncada-M AT, Aguirre-Pe J, "Scour below pipeline in river crossings", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1999.