

پیش بینی و ارزیابی عمق آبستگي در زیر خطوط لوله با به کارگیری روش های بردار پشتیبان ماشین و رگرسیون قوسی تحت موج

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

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

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

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

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

دریافت: ۱۴۰۱/۲/۲۴، بازنگری: ۱۴۰۱/۹/۷، پذیرش: ۱۴۰۱/۹/۱۹، نشر آنلاین: ۱۴۰۱/۹/۱۹

چکیده

خطوط لوله انتقال‌دهنده سیالات، یکی از مهم‌ترین عوامل توسعه و رشد اقتصادی هر کشوری محسوب می‌شوند که برای انتقال سوخت‌های سیال، پسماندها و فاضلاب‌ها و یا برای انتقال هر سیال دیگر استفاده می‌شوند. هنگامی که این خطوط لوله بر روی بستر دریا و اقیانوس قرار می‌گیرند، باعث ایجاد تغییراتی در جریان شده که افزایش تنش برشی و آشفستگی سیال را به دنبال دارد. همین امر سبب بیشتر شدن ظرفیت حمل رسوب و در نتیجه ایجاد حفره آبستگي می‌شود. با بزرگ‌تر شدن چاله آبستگي، تنش‌ها و بارهای نوسانی باعث خستگی و گسیختگی لوله‌ها می‌شود. همین امر اهمیت بررسی پدیده آبستگي در زیر خطوط لوله را نشان می‌دهد. در این تحقیق به تأثیر عوامل متعددی بر آبستگي زیر خطوط لوله تحت موج با استفاده از روش رگرسیون فرایند گاوسی (Gaussian Process Regression (GPR)) و ماشین بردار پشتیبان (Support Vector Machine (SVM)) مورد مطالعه قرار گرفته است. بدین منظور از داده‌های آزمایشگاهی متعددی که استفاده شده است و پس از تعریف چندین پارامتر بدون بعد، عملکرد روش‌های مذکور مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده به خوبی نشان‌دهنده این است که این روش‌ها نسبت به روابط تجربی نتایج بهتری دارند. با بررسی نتایج مشاهده شد که مدل ماشین بردار پشتیبان با متغیرهای ورودی Re ، θ ، KC و e/D با دارا بودن حداقل مقدار RMSE برابر 0.047 و همچنین حداکثر مقادیر R برابر 0.959 و NSE برابر 0.904 بهترین نتیجه و عملکرد را دارد و طبق نتایج به دست آمده از آنالیز حساسیت پارامتر KC ، تأثیرگذارترین پارامتر بر روی عمق آبستگي زیر خطوط لوله در حالت موج است.

کلیدواژه‌ها: عمق آبستگي، خطوط لوله، موج، توابع کرنل، روش رگرسیون گاوسی، ماشین بردار پشتیبان.

۱- مقدمه

افزایش یابد، به وجود می‌آید. توسعه حفره آبستگي در طی چهار مرحله اتفاق می‌افتد (بیات، ۱۳۷۹؛ غزل و منتصری، ۱۳۸۸) مرحله آغازین که در پی آن پدیده رگاب اتفاق می‌افتد. پس از آن مرحله توسعه که در آن سرعت درون حفره افزایش می‌یابد و تونل فرسایشی ایجاد می‌شود. مرحله سوم مرحله فرسایش ثانویه است که در آن روند آبستگي کندتر شده و شیب جداره‌های حفره کم‌تر می‌شود. در این مرحله آبستگي توسط گردابه‌ها کنترل می‌شود و تحت موج به دلیل جریان رفت و برگشتی در بالا دست و پایین دست لوله اتفاق می‌افتد.

فرسایش بستر در کناره‌های آبراهه‌ها در اثر عبور جریان آب، و یا در پایین دست سازه‌های هیدرولیکی به علت شدت جریان زیاد، و یا در اثر به وجود آمدن جریان‌های متلاطم موضعی سیال، آبستگي گفته می‌شود (شفاعی بجستان، ۱۳۷۸). آبستگي یا ناشی از تنگ‌شدگی است و یا آبستگي موضعی. هرگاه مقطع جریان به دلایلی مانند وجود پایه پل کوچک‌تر شود، سرعت جریان افزایش یافته و آبستگي ناشی از تنگ‌شدگی اتفاق می‌افتد و آبستگي موضعی در پایین دست سازه‌های هیدرولیکی و به طور کلی در هر مکانی که شدت جریان متلاطم و گردابی به طور موضعی

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۹۳۰۲۳۲۸۱۶۱

آن‌ها بر روی پدیده آبستگي زیر خطوط لوله به روش شبکه عصبی مصنوعی پرداختند و نشان دادند که روش‌های تجربی در مواردی که لوله دارای فاصله اولیه با بستر می‌باشد دارای خطا قابل ملاحظه‌ای در پیش‌بینی عمق آبستگي است.

Kim و Oh در سال ۲۰۱۱ مطالعه‌ای در مورد دلایل ایجاد آبستگي در اطراف خطوط لوله روی بستر دریا در آب‌های کم عمق انجام دادند و تأثیر پارامترهای بی‌بعد KC و عدد فرود را مورد مطالعه قرار دادند. Zang و همکاران در سال ۲۰۱۹ تأثیر پارامتر بی‌بعد فاصله اولیه لوله از بستر بر روی قطر لوله را بر عمق تعادلی آبستگي بررسی کردند. بررسی تحقیقات و مطالعات پیشین نشان می‌دهد که پدیده آبستگي زیر خطوط لوله به دلایل زیادی همچون اقتصادی و زیست‌محیطی، موضوع حائز اهمیت بوده و محققین زیادی سعی داشته‌اند که با استفاده از امکانات و روش‌های نوین هرچه دقیق‌تر روش‌هایی برای پیش‌بینی آن بیانند. به همین منظور در تحقیق حاضر نیز تأثیر پارامترهای بدون بعد بر روی عمق آبستگي به کمک روش‌های نوین کرنل محور ماشین بردار پشتیبان و رگرسیون گاوسی با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی بررسی و ارزیابی می‌شود و نتایج آن‌ها با روابط کلاسیک مقایسه خواهد شد.

۲- مواد و روش‌ها

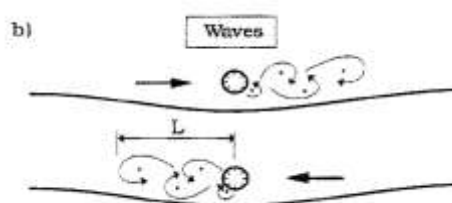
به کار گرفتن روش‌هایی که از دقت و سرعت قابل اطمینان و بالا نیز به اندازه گردآوری داده‌ها و اطلاعات حائز اهمیت می‌باشد. لذا روش‌های نوین مورد تحقیق و بررسی قرار گرفته و نتایج آن‌ها با نتایج حاصل از داده‌های میدانی و نتایج حاصل از روابط کلاسیک مقایسه می‌شوند. در این پژوهش از دو روش ماشین بردار پشتیبان و رگرسیون فرآیند گاوسی که جزو روش‌های محاسباتی نرم می‌باشند برای محاسبه عمق آبستگي و بررسی این پدیده زیر خطوط لوله استفاده شده است. هر دو این روش‌ها نسبت به روش‌هایی که در گذشته استفاده می‌شد نتایج بهتری ارائه دادند.

۲-۱- ماشین بردار پشتیبان

الگوریتم SVM اولیه در ۱۹۶۳ توسط Vapnik ابداع شد و در سال ۱۹۹۵ توسط Vapnik و Corinna Cortes برای حالت غیرخطی تعمیم داده شد. از الگوریتم SVM برای تشخیص الگو یا دسته‌بندی اشیاء در کلاس‌های خاص استفاده می‌شود. هدف الگوریتم SVM این است که خطی را بیابد که از داده‌های موجود در دو کلاس دارای بیشترین فاصله باشد و یا به عبارت دیگر کم‌ترین ریسک عملیاتی را داشته باشد. به عبارت دیگر حاشیه‌های موجود از نزدیک‌ترین داده‌ها تا خط جداکننده باید مقدار ماکزیمم را به خود اختصاص دهد. در مسائلی که داده‌ها به صورت خطی

طی سال‌های گذشته تحقیق‌ها و پژوهش‌های زیادی بر روی پدیده آبستگي در زیر خطوط لوله انجام گرفته است و محققان تأثیر پارامترهای مختلف را بر روی این پدیده بررسی کرده‌اند. همچنین مصالعات تجربی و آزمایشگاهی متعددی نیز بر روی این پدیده انجام گرفته است به طور مثال (Mao, ۱۹۸۶؛ Sumer و Fredsoe, ۱۹۹۰؛ Westerhorstmann و همکاران، ۱۹۹۲؛ Wu و Chiew, ۲۰۱۳).

Mao در سال ۱۹۸۶ نقش گردابه‌هایی را که در جلو و عقب لوله شکل می‌گیرند را بررسی کرد. او همچنین ارتباط آبستگي با جریان تراوش در زیر لوله را مورد بحث قرار داد. به این موضوع سال‌ها بعد توسط Chiew در سال ۱۹۹۰ به طور مفصل‌تری پرداخته شد.



شکل ۱- جریان دنباله‌دار حالت موج (Sumer و همکاران، ۱۹۸۸)

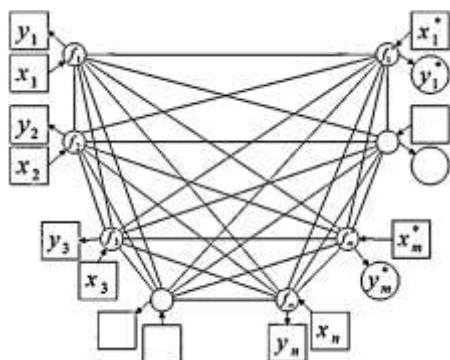
Fredsoe و Sumer در سال ۱۹۹۰ تغییرات عمق آبستگي با عدد KC را مورد بررسی قرار دادند. تغییرات عمق آبستگي بر قطر لوله با عدد KC نشان داد که پارامتر بی‌بعد $(\frac{K}{D})$ با افزایش KC افزایش می‌یابد. این رابطه بعدها توسط Cevik و Yuksel در سال ۱۹۹۹ بررسی و تأیید شد.

Fredsoe و Sumer همچنین دریافتند که آبستگي در بستر فعال تغییرات کمی با پارامتر شیلدز دارد. همچنین زبری سطح لوله تأثیری بر آبستگي ندارد و فاصله لوله نسبت به بستر پارامتر مهمی در تخمین عمق آبستگي متعادل است.

Fredsoe و Sumer در سال ۱۹۹۱ آزمایش‌هایی برای تعیین شرایط بحرانی انجام دادند و طی این پژوهش به تأثیر دو پارامتر KC و فاصله اولیه لوله بر قطر آن پرداختند و بعدها Klomp و همکارانش در سال ۱۹۹۵ تحقیقات آن‌ها را تحت جریان یکنواخت و موج هم‌زمان تعمیم دادند.

در سال‌های اخیر Mousavi و همکاران (۲۰۰۶) آزمایش‌هایی برای مطالعه آبستگي در اطراف لوله روی بستر فرسایش‌پذیر تحت موج انجام دادند و تأثیر فاصله اولیه لوله از بستر را بررسی کردند. آن‌ها همچنین رابطه‌ای برای پیش‌بینی عمق تعادلی آبستگي زیر خطوط لوله پیشنهاد دادند. Kazeminezhad و همکاران هم در سال ۲۰۱۰ به بررسی پارامترهای مختلف و تأثیر

نهان f_i که با شاخص x_i نشان داده شده‌اند، به‌طور کامل به یکدیگر مرتبط می‌باشند. هر اتصال نشان‌دهنده یک رابطه بین دو متغیر نهان بوده که توسط تابع کواریانس تعریف می‌شود (روشنگر، ۱۳۹۸).



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

فرآیند گاوسی به دلیل دانش قبلی که درباره وابستگی‌های تابعی و داده‌ها دارد، برای اجرا به هیچ فرآیند اعتبارسنجی نیاز ندارد و مدل‌های رگرسیون فرآیند گاوسی قادر به درک توزیع پیش‌بینی متناظر با آزمون ورودی هستند؛ درحالی‌که توزیع گاوسی تنها روی بردارها می‌باشد ۲۰۱۰ pal طراحی روش‌های رگرسیون مبتنی بر فرآیند گاوسی نیز شامل استفاده از مفهوم تابع کرنل است. استفاده از روش‌های مدل‌سازی مبتنی بر کرنل به ایجاد پارامترهای مناسب تعریف شده توسط کاربر نیاز دارد، زیرا دقت این روش رگرسیونی وابستگی زیادی به انتخاب این پارامترها دارد. علاوه بر انتخاب پارامترهای خاص کرنل، در رگرسیون فرآیند گاوسی به مشخص کردن مقادیر بهینه سطح نویز گاوسی نیز نیاز است (ستاری، ۱۳۹۴).

۲-۳- داده‌های مورد استفاده در تحقیق

در این پژوهش تأثیر پارامترهایی نظیر فاصله اولیه لوله از بستر، قطر لوله، پریرود موج، سرعت اریبتالی ذرات، سرعت اصطکاکی ذرات بستر، اندازه دانه‌ها، چگالی ذرات بستر و ... در قالب چهار پارامتر بی‌بعد عدد کولگان- کارپنتر (KC)، عدد شیلدز (θ) ، عدد رینولدز (Re) و پارامتر e/D (e فاصله اولیه لوله از بستر، D قطر لوله) بر روی میزان عمق آبشستگی در زیر خطوط لوله با مقطع دایره‌ای تحت موج بررسی شده است. می‌توان تأثیر این پارامترها بر روی مقدار بی‌بعد شده آبشستگی را به صورت رابطه زیر بیان کرد:

جدپذیر نباشند، داده‌ها به فضای با ابعاد بیشتر نگاشت پیدا می‌کنند تا بتوان آن‌ها را در این فضای جدید به صورت خطی جدا نمود. نحوه کارکرد الگوریتم SVM مانند اغلب روش‌های هوشمند به صورت آموزش^۱ و آزمون^۲ می‌باشد. SVM برای انتقال مسئله به فضایی با ابعاد بیشتر از توابع کرنل استفاده می‌کند. انتخاب نوع تابع کرنل نسبت به شرایط و ماهیت مسئله متغیر است و نمی‌توان تابعی را به طور قطعی به عنوان تابع مناسب برای SVM معرفی کرد. انواع مختلف تابع کرنل در جدول (۱) نشان داده شده است.

جدول ۱- انواع توابع کرنل

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 ^۳	$K(x_i, x_j) = \exp(-\frac{\ x_i - x_j\ ^2}{2\gamma^2})$
ERBF ^۴	$K(x_i, x_j) = \exp(-\frac{\ x_i - x_j\ }{2\gamma^2})$

در روابط فوق، منظور از عبارت (x_i, x_j) همان $x_i^T x_j$ می‌باشد. در حالی که دیگر روش‌های هوش مصنوعی خطای محاسباتی را کاهش می‌دهند، ماشین بردار پشتیبان برخلاف آن‌ها با هدف قرار دادن ریسک عملیاتی مقدار جواب بهینه را به دست می‌آورد. در واقع این الگوریتم با استفاده از قیدها حداقل خطا را جستجو می‌کند (Vapnik, ۱۹۹۵).

۲-۲- فرآیند رگرسیون گاوسی

Carl Friedrich Gauss در قرن ۱۹ میلادی نمادگذاری توزیع گاوسی (توزیع نرمال) را پایه‌گذاری کرد. فرآیند گاوسی را می‌توان به عنوان یک توزیع بی‌نهایت بعدی از گاوسی چند متغیره در نظر گرفت. فرآیند رگرسیون در واقع روش مدل‌سازی غیرپارامتری احتمالی را فراهم می‌کند که برای حل مسائل مختلف مهندسی به کار می‌رود (Ażman, ۲۰۰۷). مدل‌های رگرسیون گاوسی بر این فرض که مشاهده‌های تنظیمی باید شامل اطلاعاتی درباره یکدیگر باشند، استوار است. فرآیند گاوسی در واقع ترفندی برای مشخص کردن اولویت‌ها روی فضای تابع به صورت مستقیم است (Montgomery و همکاران، ۱۹۹۲).

فرآیند گاوسی مجموعه از متغیرهای تصادفی است که تعداد محدودی از آن‌ها با توزیع‌های گاوسی ادغام شده‌اند. فرآیند گاوسی تعمیمی از توزیع گاوسی می‌باشد. توزیع گاوسی در واقع توزیع بین متغیرهای تصادفی بوده درحالی‌که فرآیند گاوسی بیانگر توزیع بین توابع می‌باشد. مدل تصویری فرآیند گاوسی در شکل (۲) ارائه شده است. در این شکل f_i بیانگر $f(x_i)$ می‌باشد. مجموعه توابع

پارامترها تعریف شده در رابطه (۱) مورد ارزیابی قرار گرفت. مدل - های تعریف شده در جدول (۲) مشاهده می شوند و سپس توسط روش های رگرسیونی svm و gpr پردازش می شوند. برای رسیدن به نتایج بهتر و دقیق تر، روند آموزش با الگوهای مختلف تکرار گردید و نهایتاً الگوی ۷۵٪ داده ها جهت آموزش و ۲۵٪ داده ها جهت صحت سنجی به عنوان الگوی برتر انتخاب شده است.

جدول ۲- مدل های تعریف شده برای تخمین عمق آبشستگی

پارامتر	مدل
(KC)	WF1
(KC, θ)	WF2
(KC, θ , e/D)	WF3
(KC, θ , Re)	WF4
(KC, Re, e/D)	WF5
(KC, θ , Re, e/D)	WF6

۲-۴- معیارهای ارزیابی

به منظور ارزیابی دقت نتایج به دست آمده از پردازش مدل های مطرح شده در جدول (۲) در تخمین عمق آبشستگی زیر خطوط لوله، به ارزیابی خطاهای مدل ها می پردازیم. برای این منظور از ضریب همبستگی^۵ بین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی (R)، معیار ناش- ساتکلیف (NSE)^۶ که یکی از معیارهای مهم ارزیابی قابلیت یک مدل است و ریشه میانگین مربعات خطاها (RMSE)^۷ که بیانگر میزان انحراف بین مقادیر پیش بینی شده می باشد استفاده می شود. روابط این پارامترهای آماری در روابط (۷) و (۸) و (۹) قابل مشاهده می باشد:

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

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

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

در این روابط، 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 داده های موجود می باشد. جهت انتخاب تابع کرنل مناسب با انتخاب یکی از مدل ها و پردازش آن توسط تمامی توابع کرنل و مقایسه نتایج به دست آمده از آن ها که در جدول (۳) قابل مشاهده می باشد، می توان مشاهده کرد که به ازای مقادیر ثابت γ ، تابع کرنل RBF بهترین عملکرد را دارد. همچنین برای یافتن بهینه ترین پارامتر تابع کرنل (γ) و مقادیر پارامتر جریمه (c) و حداکثر حاشیه اطمینان (\mathcal{E}) از روش سعی و خطا استفاده شد.

$$\frac{S}{D} = f(KC, \theta, Re, \frac{e}{D}) \quad (1)$$

تأثیر عدد عدد کولگن کارپنتر (kc) که در رابطه (۲) آمده توسط محققین زیادی از جمله Sumer و Fredsoe بررسی شده است که در آن U_m ماکزیمم مقدار سرعت اوربیتالی ذرات آب در بستر، T_w پیروی موج و D قطر لوله می باشد.

$$KC = \frac{U_m T_w}{D} \quad (2)$$

پارامترهای بی بعد بعدی عدد رینولدز و شیلدز می باشند. طبق رابطه (۳) و (۴) تعریف می شوند.

$$\theta = \frac{u_*^2}{g(s-1)d} \quad (3)$$

$$Re = \frac{u_m D}{\nu} \quad (4)$$

که در آن g شتاب گرانشی زمین، s چگالی مخصوص دانه های رسوب، d اندازه دانه های بستر و U^* سرعت برشی بستر بوده و با رابطه (۵) تعریف می شود.

$$U_* = \sqrt{\frac{f_w}{2}} u_m \quad (5)$$

به f_w ضریب اصطکاک موج می گویند که روش های زیادی برای محاسبه آن وجود دارد که به طور جداگانه برای موج و جریان ارائه شده است و بسته به نوع جنس بستر یا شرایط لایه مرزی می توانیم از آن ها استفاده کنیم. داده های استفاده شده در این پژوهش نتایج مطالعات محققان پیشین بر روی ۲۵۵ مدل آزمایشگاهی داده در حالت موج می باشد (Fredsoe و Sumer، ۲۰۰۲؛ Cheng و همکاران، ۲۰۲۰؛ Fredsoe و Sumer، ۱۹۹۰؛ Zang و همکاران، ۲۰۱۹؛ Kazeminezhad و همکاران، ۲۰۱۰؛ Arisoy و Dogan، ۲۰۱۴؛ Mousavi و همکاران، ۲۰۰۹؛ Sumer و همکاران، ۲۰۰۱). آموزش نرم افزار در صورت اعمال یک سری پیش پردازش ها بر روی ورودی ها و هدف می تواند کارایی بالاتری داشته باشد. اصولاً وارد کردن داده ها به صورت خام باعث کاهش سرعت و دقت شبکه می شود. زمانی که دامنه تغییرات ورودی ها زیاد باشد آموزش بهتر و سریع تر مدل به کمک نرمال کردن داده ها انجام پذیر است. روش استفاده شده برای نرمال کردن داده ها به شرح زیر است:

$$x_n = \alpha + \beta \times \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad (6)$$

در این رابطه α برابر با صفر و β برابر یک در نظر گرفته شده است. همچنین x_{min} و x_{max} به ترتیب کم ترین و بیش ترین مقدار داده و x_n داده نرمال شده می باشد. مدل های مختلفی نیز با ترکیب

با توجه به نمودارها و نتایج به دست آمده در جداول (۴) و (۵) می‌توان مشاهده کرد که مدل WF6 تحت پردازش svm بهترین نتیجه را دارد. با بررسی نتایج مدل اول میتوان استنباط کرد که این مدل تک پارامتری (KC) نتایج خوب و بسیار قابل قبولی ارائه می‌دهد و به تنهایی عامل مهم و مؤثری برای پیش‌بینی آبشستگی می‌باشد. محققین زیادی به بررسی تأثیر این پارامتر پرداخته‌اند و تنها با در نظر گرفتن همین پارامتر روابطی برای پیش‌بینی عمق تعادلی آبشستگی زیر خطوط لوله تحت موج ارائه داده‌اند. از جمله این روابط می‌توان به رابطه (۷) که توسط Sumer و Fredsoe در سال ۱۹۹۰ ارائه شد اشاره کرد.

$$\frac{S}{D} = 0.1\sqrt{KC} \quad (7)$$

همچنین با مقایسه مدل‌های ۴ و ۵ میتوان گفت که پارامتر e/D نقش بیشتری نسبت به پارامتر Re داشته و میتوان ارتفاع لوله از بستر را عامل مهمی تلقی کرد. همچنین با مقایسه مدل‌های ۲ و ۳ و ۴ مشاهده می‌شود که پارامتر θ تأثیر کمی بر روی نتایج دارد اما با در نظر گرفتن تمامی پارامترها (مدل ۶) نتایج به مراتب بهتری حاصل شد.

۳-۱- آنالیز حساسیت مدل برتر

پس از انتخاب مدل WF6 به‌عنوان مدل برتری که بهترین نتایج را ارائه داد با کمک آنالیز حساسیت به بررسی تأثیر پارامترهای مختلف در تخمین عمق آبشستگی زیر خطوط لوله تحت موج و انتخاب تأثیرگذارترین پارامتر می‌پردازیم. بدین صورت که با حذف پارامترهای مدل برتر و پردازش مجدد مدل با استفاده از ماشین بردار پشتیبان و محاسبه معیارهای ارزیابی مدل، میزان تأثیر پارامترهای حذف شده مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج حاصل از این آنالیز در جدول (۶) نشان داده شده و مشاهده می‌گردد که پارامتر KC در برآورد عمق آبشستگی زیر خط لوله تحت موج تأثیرگذاری بیشتری دارد.

جدول ۶- نتایج به دست آمده از آنالیز حساسیت

مدل	پارامتر حذف شده	R	NSE	RMSE
WF6	-	۰/۹۵۹	۰/۹۰۳	۰/۰۴۷
WF6-1	e/D	۰/۹۵۴	۰/۸۹۳	۰/۰۴۹
WF6-2	Re	۰/۹۵۰	۰/۸۹۰	۰/۰۵۱
WF6-3	θ	۰/۹۴۲	۰/۸۸۲	۰/۰۴۸
WF6-4	KC	۰/۷۵۵	۰/۵۵۴	۰/۱۰۰

جدول ۳- نتایج به دست آمده از ماشین بردار پشتیبان با استفاده از توابع کرنل مختلف برای مدل WF6

مدل	آموزش			صحت‌سنجی		
	R	NSE	RMSE	R	NSE	RMSE
Normalized Polykernel	۰/۹۴۴	۰/۶۲۲	۰/۰۹۲	۰/۷۹۹	۰/۶۲	۰/۰۵۵
Polykernel	۰/۸۷۱	۰/۶۶۵	۰/۰۵۲	۰/۷۹۷	۰/۴۹۸	۰/۱۰۶
Puk	۰/۹۲۱	۰/۷۲۸	۰/۰۴۷	۰/۸۶۷	۰/۵۸۱	۰/۰۹۸
RBF Kernel	۰/۹۶۱	۰/۹۲۳	۰/۰۲۵	۰/۹۵۹	۰/۹۰۳	۰/۰۴۷

۳-۲ نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی

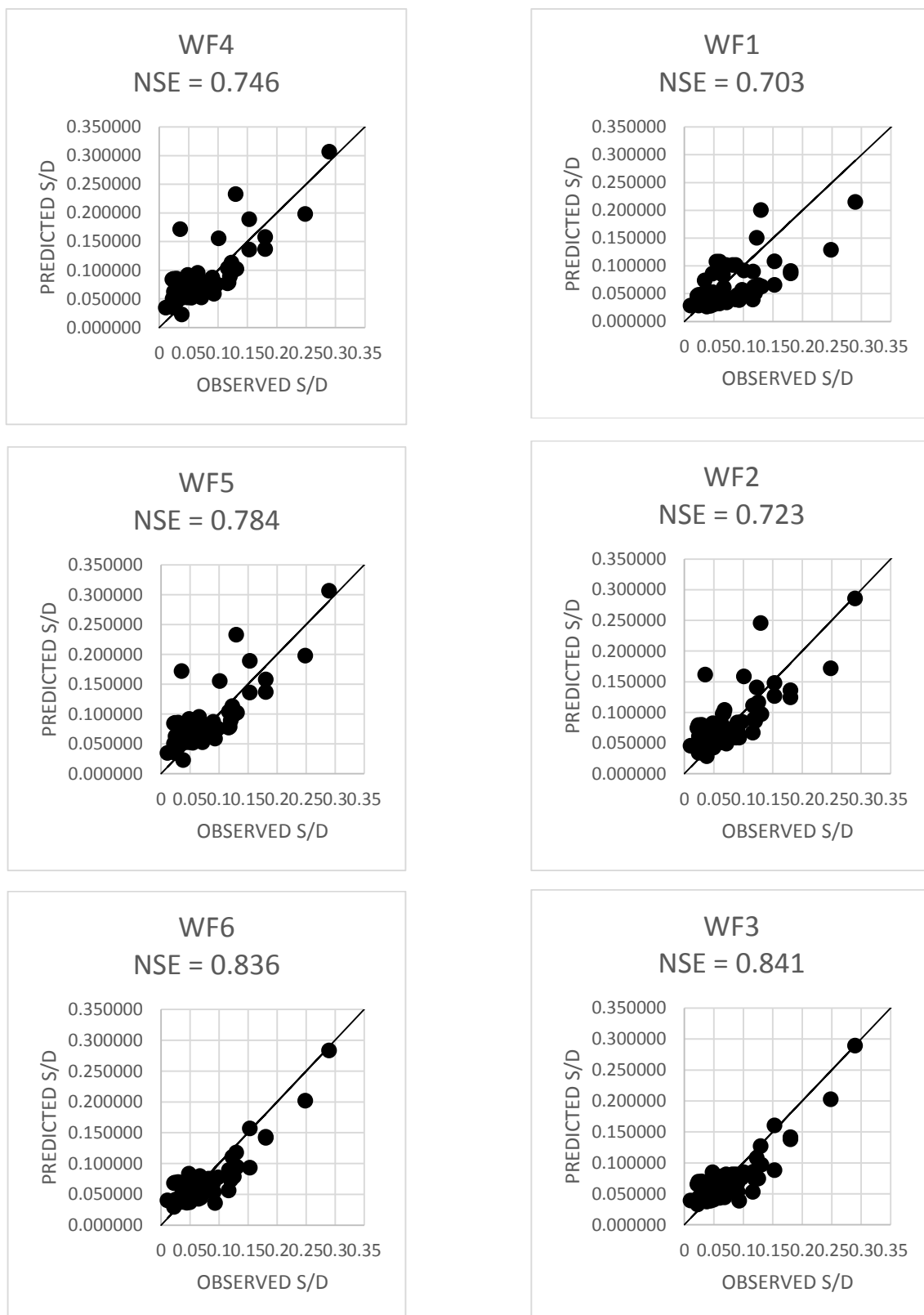
پس از تعیین مدل‌های تخمین عمق آبشستگی زیر خطوط لوله و تعیین پارامترهای ورودی و تأثیرگذار بر روی این پدیده در حالت موج و و نرمال‌سازی داده‌ها سپس مشخص شدن نوع تابع کرنل، این مدل‌ها مورد ارزیابی قرار گرفتند و نتایج حاصل از پردازش دو روش ماشین بردار پشتیبان و روش رگرسیون فرآیند گاوسی در جداول (۴) و (۵) ارائه شده است. همچنین این نتایج در غالب نمودار در شکل‌های (۳) و (۴) نشان داده شده. در این نمودارها میتوان پراکندگی داده‌های به دست آمده از روش‌های ماشین بردار پشتیبان و روش رگرسیون گاوسی را نسبت به داده‌های به دست آمده از آزمایشگاه‌ها مشاهده کرد.

جدول ۴- نتایج حاصل از مدل‌سازی پدیده آبشستگی زیر خط لوله به روش ماشین بردار پشتیبان تحت موج

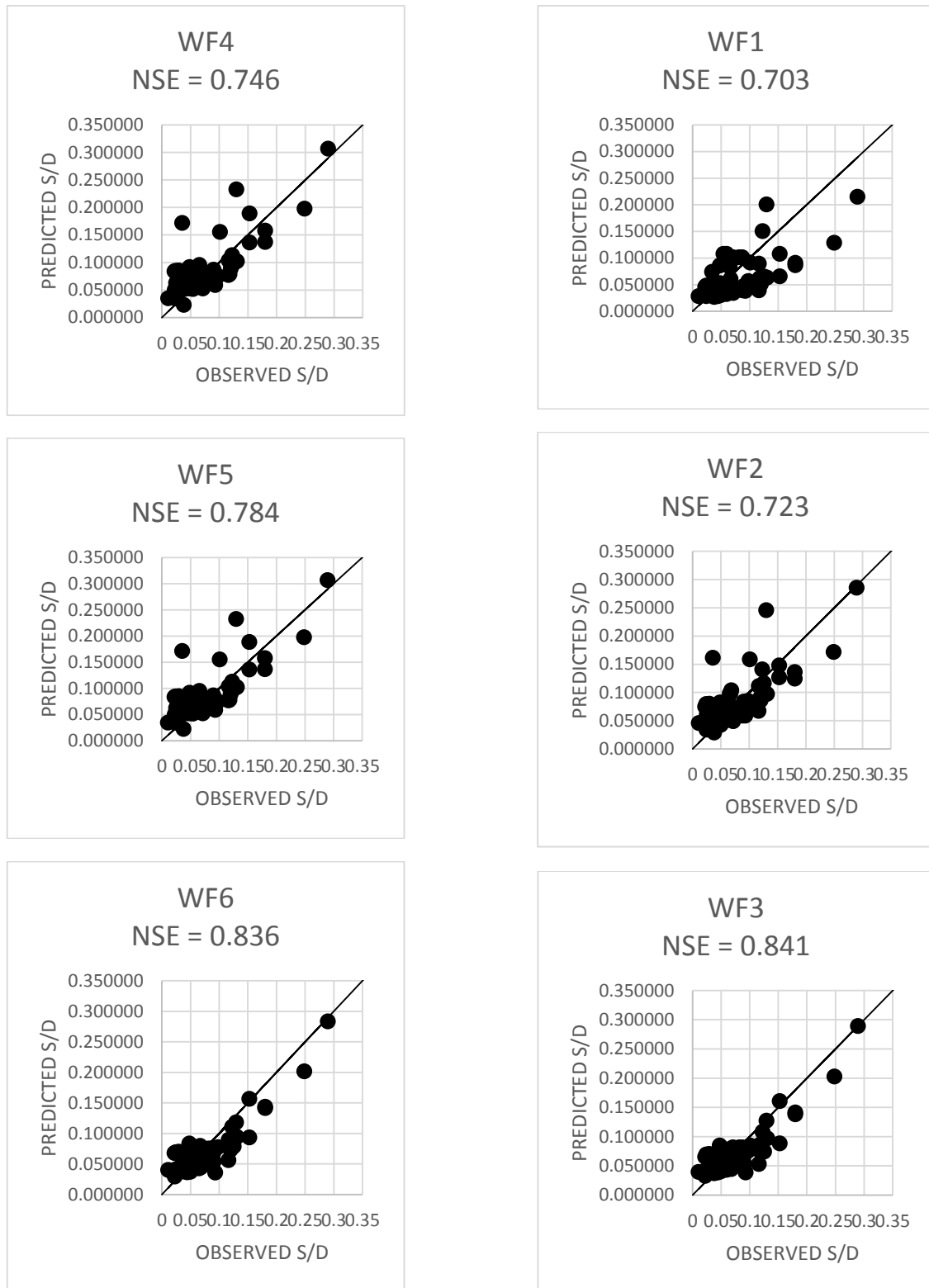
مدل	آموزش			صحت‌سنجی		
	R	NSE	RMSE	R	NSE	RMSE
WF1	۰/۹۵۰	۰/۹۰۰	۰/۰۲۸	۰/۹۴۸	۰/۸۷۷	۰/۰۳۷
WF2	۰/۹۵۰	۰/۸۹۸	۰/۰۲۸	۰/۹۴۳	۰/۸۶۸	۰/۰۵۵
WF3	۰/۹۶۰	۰/۹۲۱	۰/۰۲۵	۰/۹۵۷	۰/۸۹۵	۰/۰۴۹
WF4	۰/۹۴۹	۰/۹۰۱	۰/۰۲۸	۰/۹۴۸	۰/۸۷۸	۰/۰۵۲
WF5	۰/۹۵۶	۰/۹۱۳	۰/۰۲۶	۰/۹۵۳	۰/۸۸۸	۰/۰۵۰
WF6	۰/۹۶۱	۰/۹۲۳	۰/۰۲۵	۰/۹۵۹	۰/۹۰۳	۰/۰۴۷

جدول ۵- نتایج حاصل از مدل‌سازی پدیده آبشستگی زیر خط لوله برای به روش رگرسیون فرآیند گاوسی

مدل	آموزش			صحت‌سنجی		
	R	NSE	RMSE	R	NSE	RMSE
WF1	۰/۹۱۲	۰/۷۶۲	۰/۰۴۳	۰/۹۱۰	۰/۷۰۳	۰/۰۸۲
WF2	۰/۹۱۵	۰/۷۷۹	۰/۰۴۲	۰/۹۱۳	۰/۷۲۳	۰/۰۷۸
WF3	۰/۹۴۵	۰/۸۷۵	۰/۰۳۲	۰/۹۴۴	۰/۸۴۱	۰/۰۶۰
WF4	۰/۹۲۲	۰/۸۰۰	۰/۰۴۰	۰/۹۲۱	۰/۷۴۶	۰/۰۷۶
WF5	۰/۹۲۹	۰/۸۳۱	۰/۰۳۷	۰/۹۲۸	۰/۷۸۴	۰/۰۷۰
WF6	۰/۹۴۷	۰/۸۷۷	۰/۰۳۱	۰/۹۴۵	۰/۸۳۸	۰/۰۶۰



شکل ۴- نمودارهای نتایج حاصل از مدل سازی پدیده
آبشستگی زیر خط لوله در حالت موج به روش ماشین بردار
پشتیبان

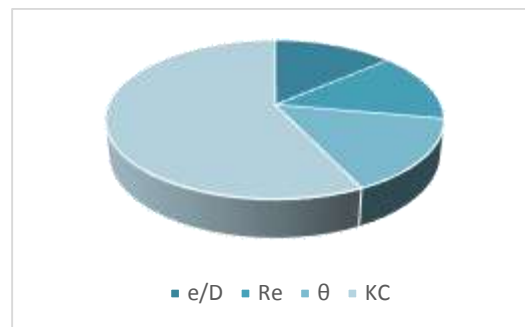


شکل ۵- نمودارهای نتایج حاصل از مدل سازی پدیده
آبشستگی زیر خط لوله در حالت موج به روش رگرسیون فرآیند
گاوسی

آمده نشان داد که هر دو روش نتایج قابل قبول و نسبتاً نزدیک به هم دارند و با اختلاف اندکی روش SVM جواب‌های بهتری ارائه می‌دهد. در هر دو روش تابع کرنل RBF به‌عنوان بهترین تابع انتخاب شد و در تمامی مدل‌ها مورد استفاده قرار گرفت. همچنین مشاهده شد که مدل WF6 با داشتن پارامترهای KC ، θ ، Re و e/D با ضرایب RMSE برابر 0.047 ، R برابر 0.959 و NSE برابر 0.903 به‌عنوان مدل برتر که بهترین نتیجه را دارد انتخاب شده و پس از انجام آنالیز حساسیت مشخص شد تأثیرگذارترین پارامتر، پارامتر KC می‌باشد. که در مدل WF1 نیز به تنهایی نتایج خوبی ارائه داد. همچنین با مقایسه مدل‌های WF3 و WF4 می‌توان مشاهده کرد که تأثیر عدد رینولدز بیشتر از پارامتر بی‌بعد e/D می‌باشد. با توجه به نتایج به‌دست آمده در این پژوهش و مقایسه انجام شده با روابط کلاسیک مشخص می‌شود که روش‌های SVM و GPR روش‌های قابل اطمینان با نتایج قابل قبول برای تخمین عمق آبشستگی زیر خطوط لوله می‌باشند.

۵- مراجع

- بیات ح، "اندرکنش سازه‌های آبی و فرسایش"، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۷۹، ۱۷۲-۲۰۵.
- ستاری م ت، رضازاده جودی ع، "تخمین عمق چاله آبشستگی پایه پیل در سازه‌های آبی با روش رگرسیون فرآیند گاوسی"، مجله تحقیقات کاربردی مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی، ۱۳۹۴، ۱۶ (۶۵)، ۱۹-۳۴.
- شفاعی بجستان م، "هیدرولیک رسوب"، انتشارات دانشگاه شهید چمران، اهواز، ۱۳۷۸.
- غزل ا، منتصری م، "ارزیابی معادلات عمق آبشستگی موضعی در رودخانه‌ها"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه ارومیه، ۱۳۸۸.
- موسوی م، یگانه بختیاری ع، انشایی ن، "پیش‌بینی عمق آبشستگی اطراف لوله‌های زیردریایی تحت اثر جریان"، هفتمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، ۱۳۸۵.
- Azman K, Kocijan J, "Application of Gaussian processes for black-box modelling of biosystems", ISA Transactions, 2007, 46, 443-457. Doi.org/10.1016/j.isatra.2007.04.001
- Çevik E, Yüksel Y, "Scour under Submarine Pipelines in Waves in Shoaling Conditions", Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 1999, 125 (1), 9-19. doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(1999)125:1(9)
- Cheng N, Wei M, Xu P, Mao R, "Length scale for evaluating wave-induced pipeline scour", Journal of Ocean Engineering, 2020, 218, 108153. Doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108153
- Chiew, Yee-Meng, "Mechanics of Local Scour Around Submarine Pipelines", Journal of Hydraulic Engineering, 1990, 116 (4), 515-529.
- Dogan M, Arisoy Y, "Time Development of Local Scour



شکل ۶- نمودار میزان تأثیر پارامترها در مدل برتر

شکل (۶) نیز میزان تأثیر پارامترهای مذکور در مدل شماره ۶ را نسبت به هم به‌صورت شماتیک بازگو می‌کند و میتوان مشاهده کرد که پارامتر KC تأثیر قابل ملاحظه‌ای نسبت سایر پارامترها دارا است.

۳-۲- نتایج حاصل از روابط کلاسیک برای برآورد عمق آبشستگی

در نتیجه تحقیقات و مطالعات تجربی و آزمایشگاهی در طی سال‌های گذشته محققان روابطی برای محاسبه عمق آبشستگی زیر لوله تحت موج ارائه دادند که به‌منظور مقایسه با نتایج به‌دست آمده از این روابط کلاسیک استفاده شده است. با توجه به نتایج به‌دست آمده از این مقایسه، نشان داده شد با این که هر دو رابطه جواب قابل قبولی را ارائه می‌دهند؛ اما نسبت به روش‌های محاسباتی بررسی و ارائه شده در این پژوهش، از دقت کم‌تری برخوردار هستند.

جدول ۷- مقایسه نتایج به‌دست آمده از سه روش کلاسیک

معیارهای صحت‌سنجی			رابطه
RMSE	NSE	R	
۰/۱۹۳	۰/۸۰۴	۰/۹۰۱	Fredsoe and Sumer (۱۹۹۰)
۰/۱۸۸	۰/۸۱۳	۰/۹۰۴	Lucassen (۱۹۸۴)

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه از ۲۵۵ داده تحت موج برای مدل‌سازی و پیش‌بینی عمق تعادلی آبشستگی زیر خط لوله استفاده گردید. برای تمامی مدل‌سازی‌های مذکور، ترکیب‌هایی از پارامترهای بدون‌بعد استفاده شده و سپس تأثیر این پارامترها مورد ارزیابی قرار گرفت. برای ارزیابی این روش‌ها با روابط کلاسیک از مقایسه نتایج حاصل شده از روش‌های SVM و GPR و نتایج حاصل از روابط تجربی استفاده شد و نشان داد که روش‌های هوش مصنوعی نسبت به روابط کلاسیک ذکرشده در این تحقیق از دقت بیشتری برخوردار بوده و نتایج بهتری ارائه می‌دهند. همچنین بررسی نتایج به‌دست

- Paper Number: ISOPE-I-92-112.
- Wu Y, Chiew YM, "Mechanics of three-dimensional pipeline scour in unidirectional steady current", *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 2013, 4 (1), 3-10. Doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000118
- Zang Z, Tang G, Chen Y, Cheng L, Zhang J, "Predictions of the equilibrium depth and time scale of local scour below a partially buried pipeline under oblique currents and waves", *Coastal Engineering*, 2019, 150, 94-107. Doi.org/10.1016/j.coastaleng.2019.04.005
- Depth below Pipelines Exposed to Waves", The 34th International Conference on Coastal Engineering, 2014. Doi.org/10.9753/icce.v34.posters.9
- Kazeminezhad MH, Etemad-Shahidi A, Yeganeh Bakhtiary A, "An alternative approach for investigation of the wave-induced scour around pipelines", *Journal of Hydroinformatics*, 2010, 12 (1), 51-65. Doi.org/10.2166/hydro.2010.042
- Kim KH, Oh HS, "Comparison of local scour around pipeline caused by waves and steady currents", *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 2011, 25 (2), 21-28.
- Klomp WHG, Hansen EA, Chen Z, Bijker R, Bryndum MB, "Pipeline seabed interaction, free span development", The Fifth International Offshore and Polar Engineering Conference, The Hague, The Netherlands, 1995. ISOPE-I-95-112.
- Mao Y, "The interaction between a pipeline and an erodible bed", PhD dissertations, Technical University of Denmark, 1986.
- Montgomery DC, Peck EA, "Introduction to Linear Regression Analysis Wiley", New York, USA, 1992.
- Mousavi ME, Bakhtiary A, Yeganeh Enshaei N, "The equivalent depth of wave-induced scour around offshore pipelines", *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 2009, 131 (2), 021601(5 Pages). Doi.org/10.1115/1.3058681
- Pal M, Deswal S, "Modelling pile capacity using Gaussian process regression", *Computers and Geotechnics*, 2010, 37 (7-8), 942-947. [http// Doi.org/10.1016/j.compgeo.2010.07.012](http://Doi.org/10.1016/j.compgeo.2010.07.012)
- 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.
- Sumer BM, Fredsoe J, "Scour below Pipelines in Waves", *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 1990, 116 (3), 307-323. Doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(1990)116:3(307)
- Sumer B, Jensen M, René H, Ye M, Fredsoe J, "Effect of lee-wake on scour below pipelines in current", *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 1988, 114 (5), 599-614. Doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(1988)114:5(599)
- Sumer BM, Fredsoe J, "Onset of scour below a pipeline exposed to waves", The First International Offshore and Polar Engineering Conference, Edinburgh, The United Kingdom, ISOPE-I-91-104, 1991.
- Sumer BM, Fredsoe J, "The mechanics of scour in the marine environment", *World Scientific*, Singapore, 2002. Doi.org/10.1142/4942
- Sumer BM, Truelsen C, Sichmann T, Fredsoe J, "Onset of scour below pipelines and self-burial", *Journal of Coastal Engineering*, 2001 42 (4), 313-335. Doi.org/10.1016/S0378-3839(00)00066-1
- Vapnik V, "N1995 the nature of statistical learning", *Theory Springer-Verlag*, New York, NY, 286pp. dx. Doi.org/10.1007/978-1-4757-2440-0
- Westerhorstmann JH, Machemehl JL, Jo CH, "Effect of pipe spacing on marine pipeline scour", The Second International Offshore and Polar Engineering Conference, San Francisco, California, USA, 1992,

EXTENDED ABSTRACT

Modeling and Predicting the Rate of Scour Depth below Pipelines in Waves Using Gaussian Process Regression (GPR) and Support Vector Machine (SVM) Methods

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: 14 May 2022; **Review:** 28 November 2022; **Accepted:** 10 December 2022

Keywords:

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

1. Introduction

Pipeline network is one of the major agents of the economic growth and development of a country, which is used to transport fluid fuels, wastewaters, and any other fluids. When these pipelines meet 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 the 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 and oscillating loads. Therefore, it is very important to study the scour depth and effective variables to reduce scour and prevent damage. Researchers have conducted experimental and numerical studies on scour phenomenon, considering various types of flows and conditions, and have provided different relations over the years.

In this research, the effect of various factors on this phenomenon in waves is investigated using Gaussian process regression (GPR) and support vector machine (SVM). 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 has shown that an SVM model with KC , Re and e/D variables in wave-induced current has the best results. It is worth mentioning that the KC variable has 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, are 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 types 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-

* 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).

dimensional distribution of multivariate Gaussian. The regression process actually provides a possible non-parametric modeling method that is used to solve various engineering problems.

The data of experiments in a rectangular flume and in a wave-induced current, from various research conducted by Sumer, Fredsoe (2002); Cheng, et al. (2020); Sumer, Fredsoe (1990); Zang, et al. (2019); Kazeminezhad, et al. (2010); Dogan, Arisoy (2014); Mousavi, et al. (2009); Sumer, et al (2001), 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.

$$\frac{S}{D} = f(KC, \theta, Re, \frac{e}{D}) \quad (1)$$

Where S is the equilibrium depth of scour, D is the pipe diameter, KC is Keulegan-Carpenter number, θ is the Shields parameter, Re is the Reynolds number; and e is the initial distance between pipe and bed.

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

$$WF6 = f(KC, \theta, Re, \frac{e}{D}) \quad (2)$$

Afterward, the obtained results were compared with the results of 2 functions 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 WF6 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 wave-induced currents, it is demonstrated that the model with input parameters of $KC, \theta, Re, \frac{e}{D}$ with the values of RMSE=0.047, R=0.959 and NSE=0.903 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 KC parameter play an essential role in estimating the scour depth under pipelines in waves, and it can independently 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 e/D on scour depth is more than the Reynolds number.

5. References

- Cheng N, Wei M, Xu P, Mao R, "Length scale for evaluating wave-induced pipeline scour", Journal of Ocean Engineering, 2020, 218, 108153. Doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108153
- Dogan M, Arisoy Y, "Time development of local scour depth below pipelines exposed to waves", The 34th International Conference on Coastal Engineering, 2014. Doi.org/10.9753/icce.v34.posters.9
- Kazeminezhad MH, Etemad-Shahidi A, Yeganeh Bakhtiary A, "An alternative approach for investigation of the wave-induced scour around pipelines", Journal of Hydroinformatics, 2010, 12 (1), 51-65. Doi.org/10.2166/hydro.2010.042
- Mousavi ME, Bakhtiary AY, Enshaei N, "The equivalent depth of wave-induced scour around offshore pipelines", Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2009, 131 (2), 021601 (5 Pages). Doi.org/10.1115/1.3058681
- Sumer BM, Fredsøe J, "Scour below pipelines in waves", Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 1990, 116 (3), 307-323. Doi.org/ 10.1061/(ASCE)0733-950X(1990)116:3(307).
- Sumer BM, Fredsoe J, "The Mechanics of Scour in the Marine Environment", World Scientific, Singapore, 2002, ISBN: 978-981-02-04930-4. Doi.org/10.1142/4942

Sumer BM, Truelsen C, Sichmann T, Fredsøe J, "Onset of scour below pipelines and self-burial", *Journal of Coastal Engineering*, 2001, 42 (4), 313-335. doi.org/10.1016/S0378-3839(00)00066-1

Zang Z, Tang G, Chen Y, Cheng L, Zhang J, "Predictions of the equilibrium depth and time scale of local scour below a partially buried pipeline under oblique currents and waves", *Coastal Engineering*, 2019, 150, 94-107. doi.org/10.1016/j.coastaleng.2019.04.005