

پیش بینی و ارزیابی عمق آبستگي در زیر خطوط لوله با استفاده از روش های پایه کرنلی تحت موج

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

^۱ استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

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

^۳ استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

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

(دریافت: --/--، پذیرش: --/--، نشر آنلاین: --/--)

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 آشفتگی 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 (GPR) و ماشین بردار پشتیبان (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 KC ، Re و $\frac{E}{D}$ با دارا بودن حداقل مقدار RMSE برابر ۰/۰۴۷ و همچنین حداکثر مقادیر R برابر ۰/۹۵۹ و NSE برابر ۰/۹۰۴ 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

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.

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.

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 افزایش یابد، به وجود می‌آید. توسعه حفره آبستگي در طی چهار

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۹۳۰۲۳۲۸۱۶۱

ملاحظه‌ایی 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 بیابند. 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

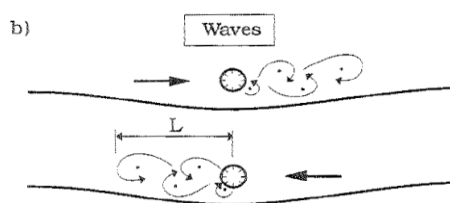
به کار گرفتن روش‌هایی که از دقت و سرعت قابل اطمینان و بالا نیز به اندازه گردآوری داده‌ها و اطلاعات حائز اهمیت می‌باشد. لذا روش‌های نوین مورد تحقیق و بررسی قرار گرفته و نتایج آن‌ها با نتایج حاصل از داده‌های میدانی و نتایج حاصل از روابط کلاسیک مقایسه می‌شوند. در این پژوهش از دو روش ماشین بردار پشتیبان 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 جداپذیر 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

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)

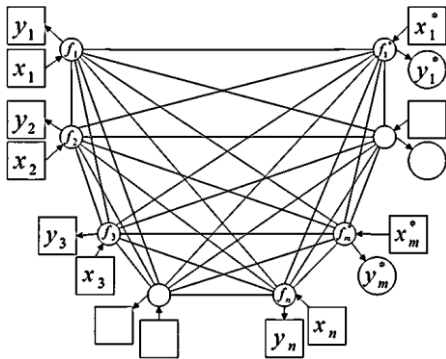
Fredsoe و Sumer در سال ۱۹۹۰ تغییرات عمق آبستگي با عدد KC را مورد بررسی قرار دادند. تغییرات عمق آبستگي بر قطر لوله با عدد KC نشان داد که پارامتر بی‌بعد $(\frac{K}{D})$ با افزایش KC افزایش می‌یابد. این رابطه بعدها توسط Cevik و Yuksel در سال ۱۹۹۹ بررسی و تأیید شد.

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 موسوی 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 رابطه‌ایی برای پیش‌بینی عمق تعادلی آبستگي زیر خطوط لوله پیشنهاد دادند. Kazeminezhad و همکاران هم در سال ۲۰۱۰ به بررسی پارامترهای مختلف و تأثیر 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

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، پرپود 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:

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

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	$K(x_i, x_j) = ((x_i, x_j) + 1)^d$
۳ RBF	$K(x_i, x_j) = \exp(-\frac{\ x_i - x_j\ ^2}{2\gamma^2})$
۴ ERBF	$K(x_i, x_j) = \exp(-\frac{\ x_i - x_j\ }{2\gamma^2})$

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 (Ažman, 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 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

پارامترها تعریف شده در رابطه (۱) مورد ارزیابی قرار گرفت. مدل-های تعریف شده در جدول (۲) مشاهده می‌شوند و سپس توسط روش‌های رگرسیونی svm و gpr پردازش می‌شوند. برای رسیدن به نتایج بهتر و دقیق‌تر، روند آموزش با الگوهای مختلف تکرار گردید و نهایتاً الگوی ۷۵٪ داده‌ها جهت آموزش و ۲۵٪ داده‌ها جهت صحت‌سنجی به‌عنوان الگوی برتر انتخاب شده است.

جدول ۲- مدل‌های 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

به‌منظور ارزیابی دقت نتایج به‌دست آمده از پردازش مدل‌های مطرح شده در جدول (۲) در تخمین عمق آبشستگی زیر خطوط لوله، به ارزیابی خطاهای مدل‌ها می‌پردازیم. 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^۷ (RMSE) که بیانگر میزان انحراف بین مقادیر پیش‌بینی شده می‌باشد استفاده می‌شود. روابط این پارامترهای آماری در روابط (۷) و (۸) و (۹) قابل مشاهده می‌باشد:

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

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

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

در این روابط، X_i مقادیر مشاهداتی، Y_i مقادیر محاسباتی، \bar{X} و \bar{Y} به‌ترتیب بیانگر میانگین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی و N تعداد کل داده‌های موجود می‌باشد. جهت انتخاب تابع کرنل مناسب با انتخاب یکی از مدل‌ها و پردازش آن توسط تمامی توابع کرنل و مقایسه نتایج به‌دست آمده از آن‌ها که در جدول (۳) قابل مشاهده می‌باشد، می‌توان مشاهده کرد که به ازای مقادیر ثابت γ ، تابع کرنل RBF بهترین عملکرد را دارد. همچنین برای یافتن بهینه‌ترین پارامتر تابع کرنل (γ) و مقادیر پارامتر جریمه (C) و حداکثر حاشیه اطمینان (\mathcal{E}) از روش سعی و خطا استفاده شد.

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 پرپود موج و D قطر لوله می‌باشد.

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

پارامترهای بی‌بعد بعدی عدد رینولدز و شیلدز می‌باشند. طبق رابطه (۳) و (۴) تعریف می‌شوند.

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

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

که در آن g شتاب گرانشی زمین، s چگالی مخصوص دانه‌های رسوب، d اندازه دانه‌های بستر و U_* سرعت برشی بستر بوده و با رابطه (۵) تعریف می‌شود.

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

به f_w ضریب اصطکاک موج می‌گویند که روش‌های زیادی برای محاسبه آن وجود دارد که به‌طور جداگانه برای موج و جریان ارائه شده است و بسته به نوع جنس بستر یا شرایط لایه مرزی می‌توانیم از آن‌ها استفاده کنیم. داده‌های استفاده شده در این پژوهش نتایج مطالعات محققان پیشین بر روی ۲۵۵ مدل آزمایشگاهی داده در حالت موج می‌باشد (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 نرم‌افزار در صورت اعمال یک سری پیش‌پردازش‌ها بر روی ورودی‌ها و هدف می‌تواند کارایی بالاتری داشته باشد. اصولاً وارد کردن داده‌ها به‌صورت خام باعث کاهش سرعت و دقت شبکه می‌شود. زمانی که دامنه تغییرات ورودی‌ها زیاد باشد آموزش بهتر و سریع‌تر مدل به‌کمک نرمال کردن داده‌ها انجام‌پذیر است. روش استفاده شده برای نرمال کردن داده‌ها 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} به‌ترتیب کم‌ترین و بیش‌ترین مقدار داده و x_n داده نرمال شده می‌باشد. مدل‌های مختلفی نیز با ترکیب

نتیجه را دارد. با بررسی نتایج مدل اول میتوان استنباط کرد که این مدل تک پارامتری (KC) نتایج خوب و بسیار قابل قبولی ارائه می دهد و به تنهایی عامل مهم و مؤثری برای پیش بینی آبشستگی می باشد. محققین زیادی به بررسی تأثیر این پارامتر پرداخته اند و تنها با در نظر گرفتن همین پارامتر روابطی برای پیش بینی عمق تعادلی آبشستگی زیر خطوط لوله تحت موج ارائه داده اند. از جمله این روابط می توان 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 مدل های 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 مدل های ۲ و ۳ و ۴ مشاهده می شود 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 به عنوان 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 می پردازیم. 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 می گیرد. نتایج حاصل از این آنالیز در جدول (۶) نشان داده شده و مشاهده می گردد 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			صحت سنجی		
	R	NSE	RMSE	R	NSE	RMSE
Normalized Polykernel	۰/۹۴۴	۰/۶۲۲	۰/۰۹۲	۰/۷۹۹	۰/۶۲۰	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 مدل سازی عددی

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

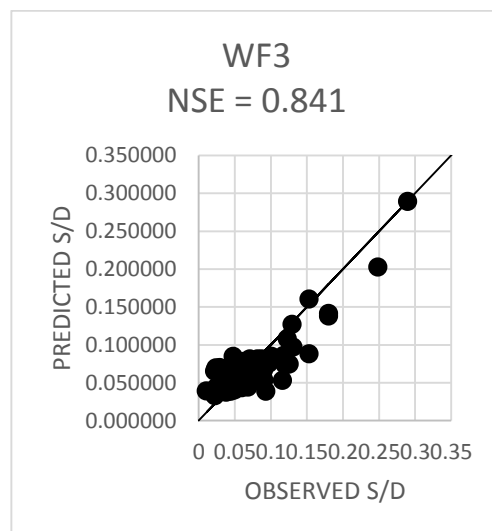
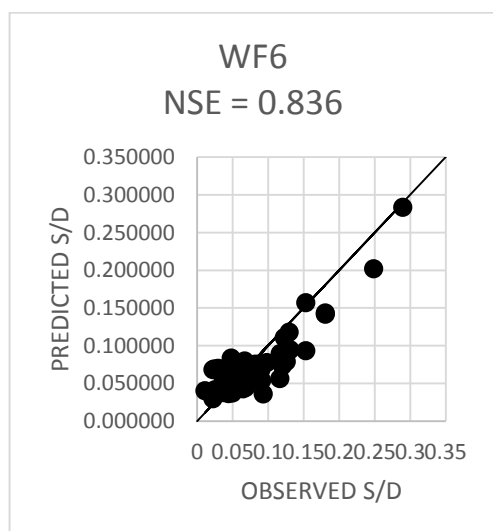
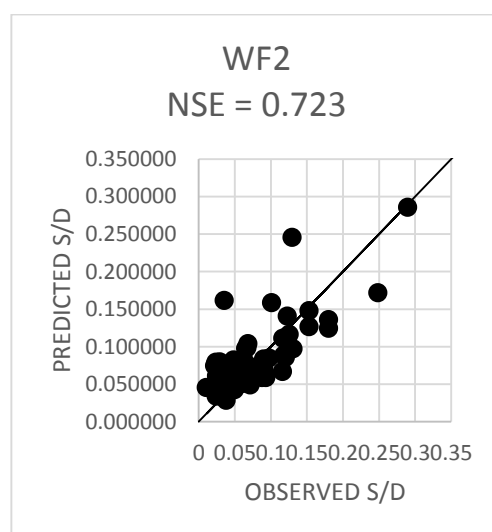
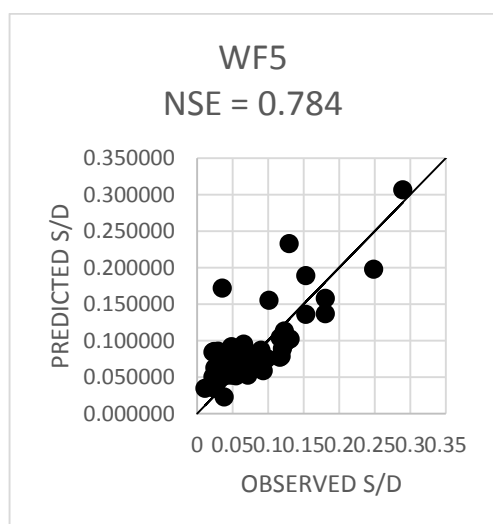
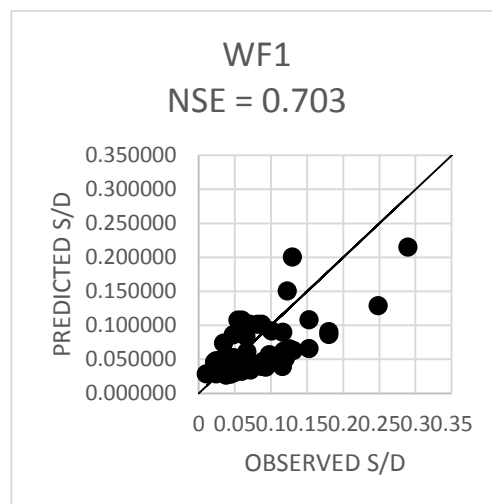
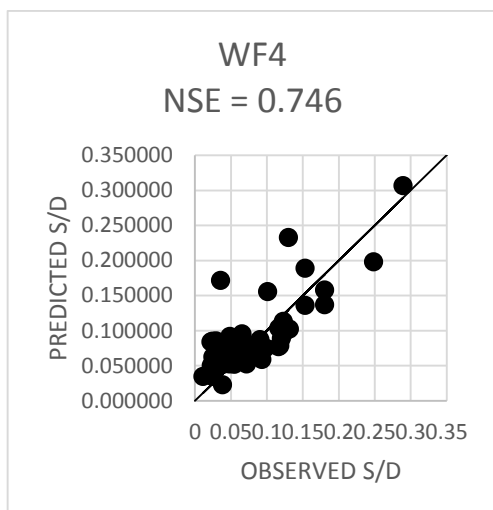
جدول ۴- نتایج حاصل از مدل سازی پدیده آبشستگی زیر خط لوله به روش ماشین بردار پشتیبان تحت موج

مدل	آموزش			صحت سنجی		
	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

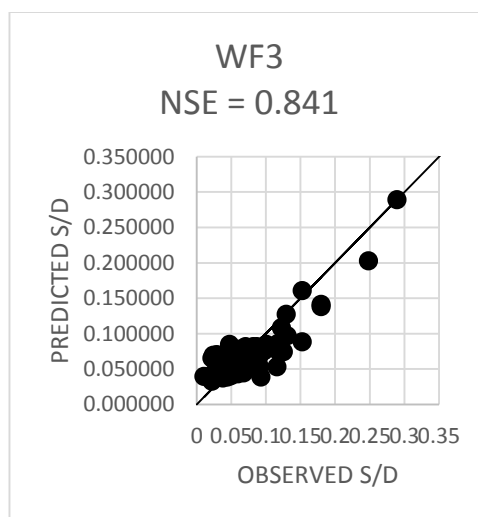
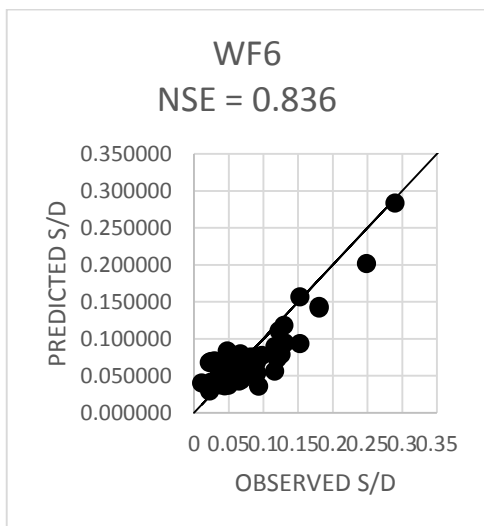
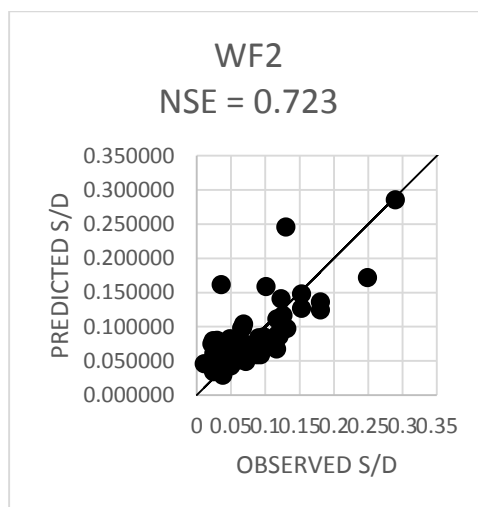
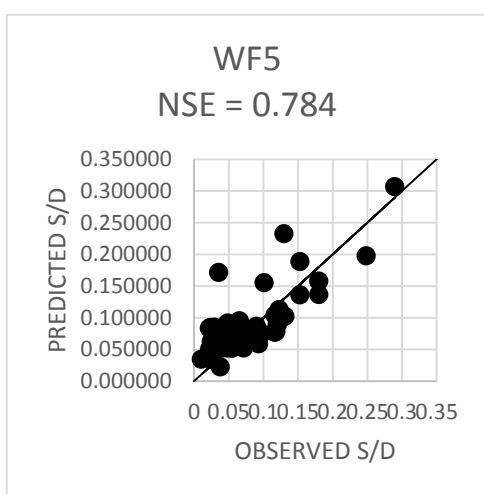
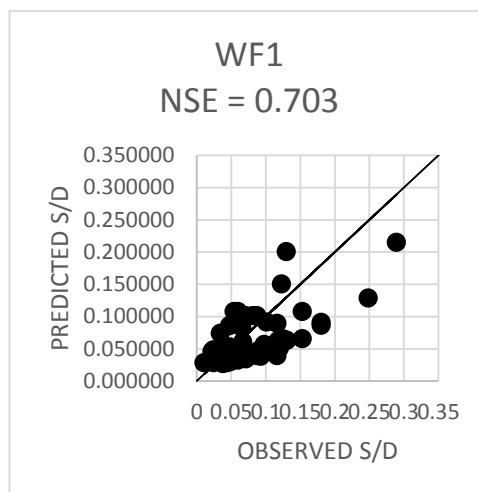
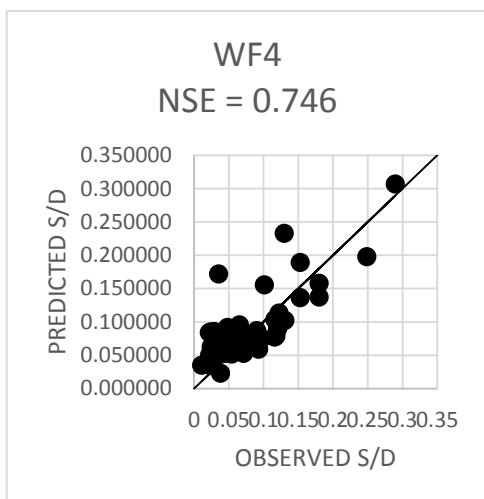
جدول ۵- نتایج حاصل از مدل سازی پدیده آبشستگی زیر خط لوله برای به روش رگرسیون فرآیند گاوسی

مدل	آموزش			صحت سنجی		
	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

با توجه به نمودارها و نتایج به دست آمده در جداول (۴) و (۵) می توان مشاهده کرد که مدل WF6 تحت پردازش svm بهترین



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

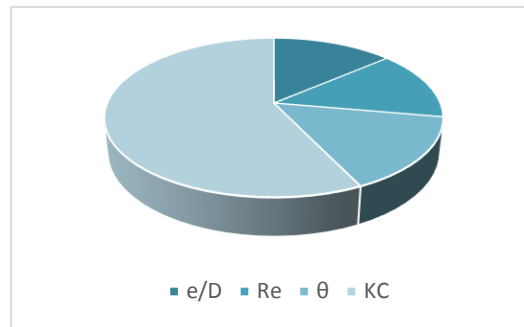


شکل ۵- نمودارهای نتایج حاصل از مدل سازی پدیده
آبشستگی زیر خط لوله در حالت موج به روش رگرسیون فرآیند
گاوسی

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 θ ، Re و e/D با ضرایب RMSE برابر 0.047 ، R برابر با 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 آبستگي 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 آبستگي پایه پل در سازه‌های آبی با روش رگرسیون فرآیند گاوسی"، مجله تحقیقات کاربردی مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی، ۱۳۹۴، ۱۶ (۶۵)، شماره صفحه؟؟؟.
- شفاعی بجستان م، "هیدرولیک رسوب"، انتشارات دانشگاه شهید چمران، اهواز، ۱۳۷۸، ۶-۲۳-۶۶-۶۷-۳۵۰.
- غزل ا، منتصری م، "ارزیابی معادلات عمق آبستگي موضعی در رودخانه‌ها"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه ارومیه، ۱۳۸۸.
- موسوی م، یگانه بختیاری ع، انشایی ن، "پیش‌بینی عمق آبستگي اطراف لوله‌های زیردریایی تحت اثر جریان"، هفتمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، ۱۳۸۵.
- Ažman K, Kocijan J, "Application of Gaussian processes for black-box modelling of biosystems", ISA Transactions, 2007, 46, 443-457.
- Cheng, Nian-Sheng; Wei, Maoxing; Xu, Puer; Mao, Ranran "Length scale for evaluating wave-induced pipeline scour", Ocean Engineering, 2020, 218 (0), 108153.
- Çevik, Esin; Yüksel, Yalçın "Scour under Submarine Pipelines in Waves in Shoaling Conditions", Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 1999, 125 (1), 9-19.
- 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 Depth Below Pipelines Exposed to Waves", The 34th International Conference on Coastal Engineering,



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 آبستگي

در نتیجه تحقیقات و مطالعات تجربی و آزمایشگاهی در طی سال‌های گذشته محققان روابطی برای محاسبه عمق آبستگي 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	(۱۹۹۰) Fredsoe and Sumer
۰/۱۸۸	۰/۸۱۳	۰/۹۰۴	(۱۹۸۴) Lucassen

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه از ۲۵۵ داده تحت موج برای مدل‌سازی و پیش‌بینی عمق تعادلی آبستگي زیر خط لوله استفاده گردید. برای تمامی مدل‌سازی‌های مذکور، ترکیب‌هایی از پارامترهای بدون بعد 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 ذکر شده در این تحقیق از دقت بیشتری برخوردار بوده و نتایج بهتری ارائه می‌دهند. همچنین بررسی نتایج به‌دست

below a partially buried pipeline under oblique currents and waves", Coastal Engineering, 2019, S0378383919300353-??????????.

- 2014.
- 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-??.
- 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.
- 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-???
- 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, Tech. Univ. of Denmark, 1986. اسم ژورنال رو کامل بنویس
- Montgomery DC, Peck EA, "Introduction to Linear Regression Analysis Wiley", New York, USA, 1992.
- Pal M, Deswal S, "Modelling pile capacity using Gaussian process regression", Computers and Geotechnics, 2010, 37 (7-8), 942-947.
- 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 B, Jensen M, René H, Ye M, Fredsøe J, "Effect of lee-wake on scour below pipelines in current", Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 1988, 114 (5), 599-614.
- Sumer B, Fredsøe M, Jorgen ???, "Scour below Pipelines in Waves", Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 1990, 116 (3), 307-323.
- Sumer BM, Fredsøe 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, Fredsøe J, "The mechanics of scour in the marine environment", World Scientific, Singapore, 2002.
- Sumer BM, Truelsen C, Sichmann T, Fredsøe J, "Onset of scour below pipelines and self-burial", 42 (4), 313-335.
- Vapnik V, "N1995 the nature of statistical learning", Theory.Springer-Verlag, New York, NY, 286pp.
- 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, Paper Number: ISOPE-I-92-112.
- Wu, Yushi; Chiew, Yee-Meng "Mechanics of three-dimensional pipeline scour in unidirectional steady current", Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice, 2013, 4 (1), 3-10.
- Zang, Zhipeng; Tang, Guoqiang; Chen, Yanfei; Cheng, Liang; Zhang, Jinfeng "Predictions of the equilibrium depth and time scale of local scour