



## مقدمه

تغییرات توپوگرافی بستر در رودخانه‌ها از جمله مسائل دارای اهمیت در مهندسی رودخانه است. این تغییرات در مسیرهای ماندری همراه با سازه‌های رودخانه‌ای نظیر آبشکن‌ها، کوله و پایه پل‌ها و پایین دست سازه‌های هیدرولیکی به دلیل آبشستگی محسوس‌تر است. به منظور بررسی تغییرات توپوگرافی بستر از دیرباز مطالعاتی گسترده انجام شده است که می‌توان به پژوهش‌های زیر اشاره کرد: کوهنل و همکاران [۱۴] الگوی آبشستگی اطراف آبشکن‌ها را بررسی نمودند و نتیجه گرفتند که در آزمایش با عمق جریان کمتر، محل بیشینه‌ی آبشستگی در بالادست آبشکن قرار دارد، در حالی که در آزمایش با عمق جریان بیشتر، محل بیشینه‌ی آبشستگی در بالا دست آبشکن و در فاصله‌ای در حدود نصف طول آبشکن از دیواره‌ی کانال قرار دارد. ایشان روابطی برای حجم و هندسه حفره آبشستگی اطراف آبشکن‌های بسته ارائه نمود. اسپانرینگ [۲۱] به بررسی و پیش‌بینی فرسایش بستر رودخانه با آبشکن‌ها پرداخت و نشان داد که بستر تعادل یافته‌ی رودخانه را می‌توان با یک تابع سهمی مرتبه‌ی چهار برآورد کرد. ادگارد [۱۸] به بررسی توپوگرافی بستر در قوس ۱۸۰ درجه پرداخت و نشان داد که حفره‌ای فرسایشی بین مقاطع ۳۰ تا ۷۰ درجه و حفره‌ای دیگر پایین‌تر از مقطع ۱۲۰ درجه ایجاد می‌شود که عمق حفره‌ی نخست نزدیک به ۳۰ درصد بزرگتر از عمق حفره‌ی دوم است، ادگارد [۱۹] با استفاده از یک مدل ریاضی الگوی جریان و تغییرات بستر را در رودخانه‌های ماندری آبرفتی مدل‌سازی کرد. برگ [۱۱] پژوهش‌هایی در قوس ۹۰ با هدف برداشت داده‌های آزمایشگاهی از الگوی سرعت و تغییرات توپوگرافی بستر و مقایسه آن با مدل ریاضی انجام داد که با نتایج پژوهش‌های ادگارد [۱۸] همخوانی کامل داشت. دهقانی و همکاران [۵] نتیجه گرفتند که در نیمه‌ی نخست قوس، یک تپه‌ی رسوبی در قوس داخلی و یک چاله‌ی فرسایشی رو به روی این تپه‌ی رسوبی در قوس خارجی شکل می‌گیرد. همچنین در نیمه‌ی دوم قوس، تپه‌ی رسوبی در قوس داخلی و چندین ناحیه‌ی فرسایشی در قوس خارجی شکل می‌گیرد که محل چاله‌های فرسایشی، تابعی از شرایط هیدرولیکی جریان بوده و با افزایش عدد فرود، به سمت رأس قوس جا به جا می‌شود. مقایسه‌ی نتایج پروفیل عرضی بستر در شرایط گوناگون هیدرولیکی نیز نشان داد که با افزایش عدد فرود، شیب عرضی جریان در محل بیشینه‌ی رسوبگذاری و فرسایش، افزایش می‌یابد. قدسیان و موسوی [۱۳] به مطالعه‌ی تغییرات بستر

## مقایسه‌ی روش‌های درون‌یابی در بررسی توپوگرافی بستر کانال‌های قوسی

محمد واقفی<sup>۱</sup>، علی احمدآبادی<sup>۲</sup>، امان‌اله فتح‌نیا<sup>۳</sup> و مسعود قدسیان<sup>۴</sup>  
تاریخ دریافت: ۸۷/۳/۲۶ تاریخ پذیرش: ۸۸/۲/۵

## چکیده

مطالعه‌ی تغییرات بسترهای رسوبی در شناخت رفتار رودخانه، از جمله مسایل مورد توجه مهندسان رودخانه می‌باشد. با توجه به این که در قوس رودخانه‌ها میزان آبشستگی و رسوبگذاری در مقایسه با مسیرهای مستقیم مشهودتر است، شناخت چگونگی تغییرات توپوگرافی بستر قوس‌ها و الگوی آبشستگی و رسوبگذاری از نکات جالب توجه مهندسان هیدرولیک می‌باشد. در این پژوهش با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی در قوس ۹۰ درجه و همچنین قوس با آبشکن T شکل مستقر در ساحل خارجی قوس، به بررسی تغییرات توپوگرافی بستر پرداخته شده است. بدین منظور از روش‌های درون‌یابی کریجینگ (Kriging)، وزن‌دهی عکس فاصله (IDW) و اسپلاین کششی (Spline Tension) برای تبدیل برداشت‌های نقطه‌ای به سطوح پیوسته و برای ارزیابی دقت از روش اعتباریابی متقاطع (Cross Validation) استفاده شده است. نتایج نشان داد که روش کریجینگ بهترین دقت را در تعیین توپوگرافی بستر در کانال‌های قوسی دارد.

واژه‌های کلیدی: زمین‌آمار، کریجینگ، IDW، اسپلاین کششی و کانال‌های قوسی.

۱- استادیار سازه‌های هیدرولیکی، گروه عمران، دانشگاه خلیج فارس- بوشهر، vaghefi@pgu.ac.ir

۲- دانشجوی دکتری ژئومرفولوژی، دانشگاه تربیت مدرس res.ac.ir ahmadabadi@moda

۳- دانشجوی دکتری اقلیم‌شناسی، دانشگاه تربیت مدرس res.ac.ir a\_fathnia@moda

۴- استاد هیدرولیک، پژوهشکده مهندسی آب، دانشگاه تربیت مدرس ghods@modares.ac.ir

شبکه‌ی آبراهه‌ای رقومی گسسته با توسعه‌ی یک مدل شیء گرا در محیط GIS پرداختند و نتیجه گرفتند که این مدل افزون بر رفع مشکلات نرم‌افزارهای GIS در تولید شبکه‌ی آبراهه‌ی مصنوعی، قادر است شبکه‌های گسسته‌ی رقومی را به شبکه‌های پیوسته تبدیل نماید به گونه‌ای که تعداد و موقعیت شاخه‌ها در شبکه‌ی آبراهه‌ای اولیه برابر و جهت جریان آب در آنها منطبق بر الگوی جریان آب حوزه آبریز است. وفاخواه و همکاران [۱۰] به کاربرد زمین آمار در برآورد عمق و چگالی برف در حوزه‌ی آبریز اوزان پرداختند و برآورد مقادیر عمق و چگالی برف با تحلیل واریوگراف به دست آمده به روش کریجینگ معمولی انجام گرفت و نشان داد که روش زمین آمار با تحلیل واریوگرام به روش کریجینگ برای عمق برف و چگالی برف مناسب است.

در این پژوهش کارایی و میزان دقت روش‌های گوناگون زمین آمار درونیابی فضایی در بررسی توپوگرافی بستر کانال‌های قوسی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. روش‌های درونیابی فضایی مورد استفاده، روش‌های وزن دهی عکس فاصله، کریجینگ و اسپلاین کششی می‌باشد.

### مواد و روش‌ها روش پژوهش

روش‌های درونیابی فضایی مورد استفاده به شرح زیر می‌باشد:

#### اسپلاین

روی هم رفته، اسپلاین‌ها توابع نا پارامتری با قابلیت ارتجاعی بالا هستند. منظور از نا پارامتری بودن این است که این توابع متکی بر داده‌های مربوط به توزیع و پارامترهای جامعه نمی‌باشند. در این روش دو پارامتر کشیدگی و پیرایشی به کاربر این امکان را می‌دهد که با تغییر آنها بهترین مدل را به نقاط برازش دهد. با افزایش پیرایش، داده هموارتر می‌شود، ولی با افزایش کشیدگی (کاهش پیرایش) سطح برآورد شده به سمت داده‌های واقعی میل می‌کند [۸]. درجه‌ی مشتق در اسپلاین برابر با درجه‌ی روند چند جمله‌ای در کریجینگ به علاوه‌ی یک می‌باشد. تابع کوواریانس در اسپلاین به صورت زیر بیان می‌شود [۴]:

$$\begin{cases} C(h)=h^k \cdot \log |h| \\ C(0)=\xi \end{cases} \quad (1)$$

که در آن  $C(h)$  تابع کوواریانس،  $m$  درجه‌ی مشتق نسبی داده‌های مشاهده شده،  $h$  فاصله‌ی بین نقاط مشاهده شده و  $\xi$  پارامتر نرم‌شدگی یا پیرایشی است که همان نقش اثر قطعه‌ای در کریجینگ را بازی می‌کند. در این پژوهش از اسپلاین کششی<sup>۵</sup> به دلیل هموارکنندگی کمتر استفاده شده است. برای برآورد اسپلاین کششی مشتق اول در معیار کمینه‌سازی دخالت داده می‌شود و مقادیر را بر اساس رابطه‌ی زیر برآورد می‌کنند:

با توجه به فاکتورهای عمق جریان، سرعت جریان و ویژگی‌های مواد بستر پرداختند و به این نتیجه رسیدند که بیشینه‌ی عمق آبشستگی با عدد فرود در ارتباط است. در مطالعات تغییرات توپوگرافی بستر کانال‌ها به گونه‌ی معمول برداشت داده‌های توپوگرافی، به صورت شبکه‌ای از نقاط انجام می‌شود. این عملیات زمان بر بوده و هزینه‌ی نسبتاً زیادی را تحمیل می‌کند، بنابراین اگر از راهی بتوان با تعداد محدودی اندازه‌گیری، نسبت به افزایش تعداد داده‌ها اقدام نمود، در وقت و هزینه صرفه جویی شایان توجهی صورت خواهد گرفت. همچنین برای بررسی ساختار فضایی بستر ضروری است که این داده‌ها به سطح بستر تعمیم داده شود. الگوریتم‌های گوناگونی برای این کار وجود دارد که برخی مبتنی بر آمار کلاسیک و برخی دیگر مبتنی بر روش‌های زمین آمار است. آمار کلاسیک مبتنی بر مستقل بودن نمونه‌ها از یک دیگر است، اما در روش زمین آمار نمونه‌ها تا فاصله‌ی مشخصی دارای وابستگی مکانی هستند و با مدل ریاضی وریوگرام<sup>۱</sup> می‌توان این وابستگی را نشان داد.

کاربرد روش‌های زمین آمار در مطالعات معادن شروع شد و سپس در علوم دیگر توسعه یافت. چاپل و همکاران [۱۲] به بررسی زمین آمار تغییرپذیری فضایی با استفاده از سِمی وریوگرام<sup>۲</sup> به تفسیر مورفودینامیکی رودخانه با یک بستر ماسه‌ای در دوره‌های زمانی گوناگون پرداختند. لگ لیتِر و همکاران [۱۵] با استفاده از آنالیز زمین آمار تأثیرات توپوگرافی بستر و عناصر ناهمواری زیاد روی ساختار جریان در ارتباط با تغییرات در تغییرپذیری فضایی سرعت و شدت تلاطم را مورد بررسی قرار دادند. مرواد و همکاران [۱۷] روش‌های درونیابی فضایی گوناگون را برای کاربرد در درونیابی عمق سنجی رودخانه مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسید که روش کریجینگ در مطالعه‌ی ناهمسانگردی رودخانه نسبت به دیگر روش‌ها بهتر است، اما به خاطر پیچیدگی آن، روش وزن دهی عکس فاصله‌نمایی<sup>۳</sup> EIDW را که یک روش اصلاحی بود، پیشنهاد دادند. میر و همکاران [۱۶] بر اساس تحلیل‌های زمین آمار، توزیع فضایی رسوبات ریز دانه‌ی بستر خلیج شرقی سین واقع در غرب فرانسه را مورد بررسی قرار دادند. قهرودی تالی [۷] با بررسی دقت روش کریجینگ به این نتیجه رسید که این مدل در تحلیل‌های جغرافیایی به دلیل وابستگی به ساختار فضایی نقاط نمونه، اثرپذیری از دامنه تغییرات نمونه‌ها، هموارسازی، جمع‌پذیری و مطلق بودن نسبت به دیگر روش‌ها از دقتی بالا برخوردار نیست. شش‌انگشت و همکاران [۳] با ارزیابی مدل‌های زمین آمار برای برآورد فرساینده‌ی باران در حوضه‌ی آبخیز لتیان به این نتیجه رسید که روش کوکریجینگ<sup>۴</sup> بهترین روش بر مبنای مدل گوسین است و امکان کاهش خطای درونیابی با استفاده از این الگوریتم می‌باشد. طباطبایی و همکاران [۹] به ترمیم

- 1- Variogram
- 2- Semivariogram
- 3- Exponent Inverse Distance Weighting
- 4- Cokriging

5- Spline Tension

نزدیکی مبدا، رفتاری خطی دارد که نشان دهنده‌ی پیوستگی خوب مدل است. سپس به تدریج از شیب منحنی کم می‌شود و در فاصله‌ی دامنه‌ی تأثیر به حد آستانه می‌رسد و در این حد باقی می‌ماند. معادله‌ی این مدل به شرح زیر است [۸]:

$$y(h) = C_0 + C \left[ \frac{3h}{2a} - \frac{h^3}{2a^3} \right] \quad a < h \quad (4)$$

$$y(h) = C_0 + C \quad a > h \quad (5)$$

که در آن  $C_0 + C$  آستانه،  $a$ : دامنه‌ی تأثیر و  $C_0$  اثر قطعه‌ای می‌باشد.

### وزن‌دهی عکس فاصله<sup>۱</sup>

یک روش کاملاً ریاضی است و بر پایه‌ی فاصله‌ی بین نقاط مشاهده شده و نقطه‌ای که باید درونیابی شود، می‌باشد. این روش یک روش پیشرفته‌ی نزدیک‌ترین همسایه است که اجازه می‌دهد تعدادی از نقاط همجوار در برآورد وزن‌های درونیابی سایر نقاط شرکت کنند و بدین ترتیب نزدیک‌ترین نقطه بیش‌ترین وزن را به دست می‌آورد و ایستگاه‌های دورتر بالعکس که از نظر ریاضی IDW به صورت زیر بیان می‌شود [۲۰].

$$Z_j^* = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{Z_i}{h_{ij}^\beta}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{h_{ij}^\beta}} \quad (6)$$

$Z_j^* = Z_j$ : ارزش ارزیابی شده در نقطه  $Z_j$ ،  $Z_i$ : ارزش در نقطه  $i$ ،  $i = 1, 2, \dots, n$  مختصات برای نقاط همسایه،  $Z$ : مختصات برای نقاط برآورد شده،  $h_{ij}$ : مسافت بین نقطه برآورد شده و نقاط همسایه و  $\beta$  = توان وزنی

### آزمایش‌ها

به منظور بررسی روش‌های زمین‌آماری، در شرایط آزمایشگاهی برداشت‌هایی از تغییرات توپوگرافی بستر کانال با قوس ۹۰ درجه (شکل ۱) همراه با آبشکن و بدون آن صورت گرفت. ویژگی‌های کانال قوسی به شرح زیر است؛ این کانال شیشه‌ای که توسط قاب‌های فولادی پایداری آن حفظ می‌شود، شامل یک مسیر مستقیم به طول ۷/۱ متر در بالا دست، به دنبال آن قوسی ۹۰ درجه با شعاع انحناء خارجی ۲/۷ متر و در انتها مسیر مستقیمی به طول ۵/۲ متر در پایین دست قوس بود. نسبت شعاع قوس به عرض کانال برابر ۴ و ارتفاع و عرض کانال به ترتیب ۷۰ و ۶۰ سانتی‌متر بود. کف کانال را رسوباتی با میانگین قطر ۱/۲۸ میلی‌متر، انحراف معیار ۱/۳ و ضخامت ۳۵ سانتی‌متر می‌پوشاند. آزمایش با دبی ۲۵ لیتر بر ثانیه در شرایط آب تمیز و مدت زمان تعادل بستر ۲۴ ساعت انجام شد. برداشت داده‌های توپوگرافی بستر توسط دستگاه برداشت پروفیل لیزری<sup>۲</sup> (LBF) صورت گرفت (شکل ۲)، این دستگاه به صورت

$$R(r) = \frac{1}{2\pi\phi} \left[ \ln \left( \frac{r\phi}{2} \right) + c + K_0(r\phi) \right] \quad (2)$$

$T(x,y) = a_1$  که در آن  $\phi$  پارامتر کنترل‌کننده‌ی مشتق اول در معیار کمینه‌سازی،  $r$  فاصله‌ی بین نقطه‌ی نمونه و نقطه‌ی برآورد شده،  $k$  تابع تعدیل شده بسط،  $C$  ثابتی معادل با ۰/۵۷۷۲۱۵،  $T(x,y)$  بر اساس نوع اسپلاین توسط کاربر تعیین می‌شود و  $a_1$  ضریبی است که از راه حل مجموعه‌ای از معادلات خطی به دست می‌آید [۶].

### کریجینگ

کریجینگ یک روش برآورد است که بر منطق میانگین متحرک وزنی استوار است و در مورد آن می‌توان گفت که بهترین تخمین‌گر نارایب است زیرا نخست بدون خطای سیستماتیک می‌باشد و دوم واریانس برآورد آن، کمینه است. لازمه‌ی برقراری شرط نخست، صفر بودن میانگین خطای برآورد است [۲]. مطلق بودن برآورد در درونیابی از ویژگی‌های عمده‌ی مدل کریجینگ می‌باشد. بدین مفهوم که مقدار برآورد کمیت در نقاط نمونه برداری با مقدار اندازه‌گیری شده برابر است و واریانس برآورد صفر می‌شود. این ویژگی سبب می‌شود که برآوردکننده‌ی کریجینگ در رسم خطوط هم‌ارزش از بیشینه‌ی نقاط نمونه برداری عبور نموده و تمایلی به بسته شدن و دور زدن نداشته باشد و از مرز محدوده‌ی مورد مطالعه فراتر رود. در روش کریجینگ، هر نمونه‌ی معلوم در برآورد نقطه‌ی مجهول، بستگی کامل به ساختار فضایی محیط مربوطه دارد. در حالی که در روش‌های دیگر، وزن‌ها فقط به یک مشخصه‌ی هندسی مانند فاصله بستگی دارد و با تغییر ساختار فضایی نمونه‌ها، تغییری نمی‌کند و با ضعیف شدن ساختار فضایی، نقش نمونه‌ها کمتر می‌شود. تا آنجا که وزن تمام نمونه‌ها برابر خواهد شد. به بیان دیگر، دامنه‌ی تأثیر متغیر معلوم بر متغیر مجهول به بیشینه و کمینه‌ی فاصله‌ی نمونه‌ها از هم بستگی دارد، لذا در استفاده از این روش باید به توزیع فضایی نمونه‌ها و دامنه‌ی تأثیر آنها توجه شود [۷].

در روش کریجینگ با استفاده از آنالیز نیم تغییر نما می‌توان ساختار فضایی را مدل‌سازی نمود. نیم تغییر نما کمیتی برداری است که درجه‌ی همبستگی مکانی و شباهت بین نقاط اندازه‌گیری شده را بر حسب مربع تفاضل مقدار دو نقطه و با توجه به جهت و فاصله‌ی آنها نشان می‌دهد و آنرا با فرمول زیر نشان می‌دهند:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{n(h)} [Z(x_i+h) - Z(x_i)]^2 \quad (3)$$

که در آن:  $N(h)$  تعداد جفت نمونه‌های به کار رفته در محاسبه که در فاصله‌ی  $h$  از یکدیگر قرار دارند،  $Z(x_i)$  مقدار مشاهده شده‌ی متغیر مورد نظر و  $Z(x_i+h)$  مقدار مشاهده شده‌ی متغیر مورد نظر که به فاصله‌ی  $h$  از  $Z(x_i)$  قرار دارد، می‌باشد [۴]. در این پژوهش از مدل کروی برای برازش نیم تغییر نما استفاده شده است. این مدل در

1- Inverse Distance Weighting

2- Laser Bed Profiler

ضروری است که روش‌های گوناگون برای متغیر مورد نظر به گونه‌ای مورد مقایسه و ارزیابی قرار گیرند و از بین آنها روش مناسب توصیه گردد. در این رابطه، روش اعتباریابی متقاطع<sup>۲</sup> برای ارزیابی روش‌های زمین آماری روشی مناسب است. در این روش، هر بار یک نقطه‌ی مشاهده‌ای حذف شده و با استفاده از نقاط مجاور و مدل مورد نظر، مقداری برای نقطه‌ی حذف شده برآورد می‌گردد، سپس مقدار واقعی به محل قبلی برگردانده شده و برای تمامی نقاط شبکه، این عمل تکرار می‌شود. در نهایت با توجه به مقادیر مشاهده و برآورد شده، خطای اریب میانگین<sup>۳</sup> و خطای مطلق میانگین<sup>۴</sup> روش میان‌یابی می‌تواند با استفاده از روابط زیر محاسبه شود [۱]:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{x=1}^n |\hat{Z}(X_i) - Z(X_i)| \quad (7)$$

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{x=1}^n (\hat{Z}(X_i) - Z(X_i)) \quad (8)$$

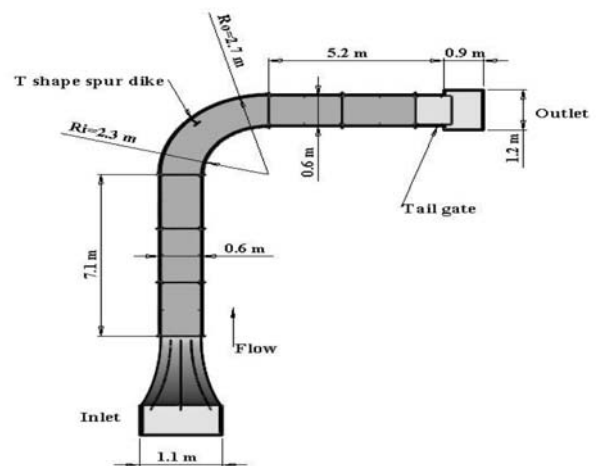
کاملاً خودکار و بدون تماس با بستر، با دقت کمتر از نیم میلی‌متر در مسیرهای مستقیم و قوسی کانال، داده توپوگرافی بستر را ثبت می‌کند و به صورت مختصات سه بعدی در اختیار کاربر قرار می‌دهد. دستگاه مورد نظر با سنسور لیزری، داده توپوگرافی را در نرم‌افزاری با عنوان برداشت‌کننده بستر<sup>۱</sup> ذخیره و در مسیرهای قوسی محاسبات مختصات قطبی را به دکارتی تبدیل می‌کند. برای مطالعه مورد نظر، دو آزمایش اجرا شد: ۱- قوس بدون آبشکن با شبکه‌ی ۲۷۰۰ نقطه‌ای شامل ۴۵ مقطع عرضی و ۶۰ نقطه در هر مقطع، ۲- قوس با استقرار آبشکن در موقعیت ۴۵ درجه، با شبکه‌ی نا یکنواخت شامل ۳۹۶۰ نقطه و ۶۶ مقطع عرضی که در اطراف آبشکن به دلیل تغییرات شدید توپوگرافی بستر از شبکه ریزتر (شکل ۳) استفاده شد.

### ارزیابی دقت

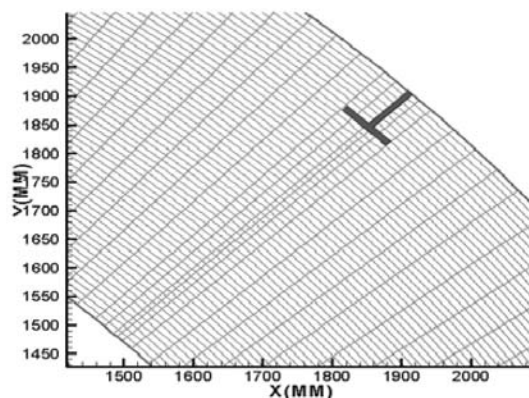
بررسی‌های موجود نشان می‌دهد که نوع متغیر و تغییرپذیری مکانی آن، روش مناسب زمین آماری را مشخص می‌کند، لذا



شکل ۲- نمایی از دستگاه برداشت پروفیل بستر لیزری



شکل ۱- نمایی از کانال قوسی



شکل ۳- بخشی از شبکه‌ی برداشت توپوگرافی بستر

2- Cross Validation

3- Mean Bias Error

4- Mean Absolute Error

1- Laser Bed Profiler

مطلق میانگین، خطای اریب میانگین و خطای مجذور مربع میانگین در روش کریجینگ به ترتیب برای قوس بدون آبشکن به ترتیب ۱/۴، ۰/۱۷ و ۱/۵۵ می باشد، هر چه این مقادیر کمتر باشد (جدول ۱)، اعتبار بیشتر مدل را نشان می دهد که روش کریجینگ نسبت به دیگر روش های درون یابی از میزان دقت بیشتری برخوردار است، اما در روش اسپلاین کششی به ترتیب در حدود ۱/۴۵، ۰/۱۱ و ۱/۶

جدول ۱- ارزیابی روش های درون یابی در قوس بدون آبشکن

روش های درون یابی	MAE	MBE	RMSE
کریجینگ بدون آبشکن	۱/۴	۰/۱۷	۱/۵۵
IDW بدون آبشکن	۱/۷	۰/۱۲	۱/۹۵
اسپلاین کششی بدون آبشکن	۱/۴۵	۰/۱۱	۱/۶

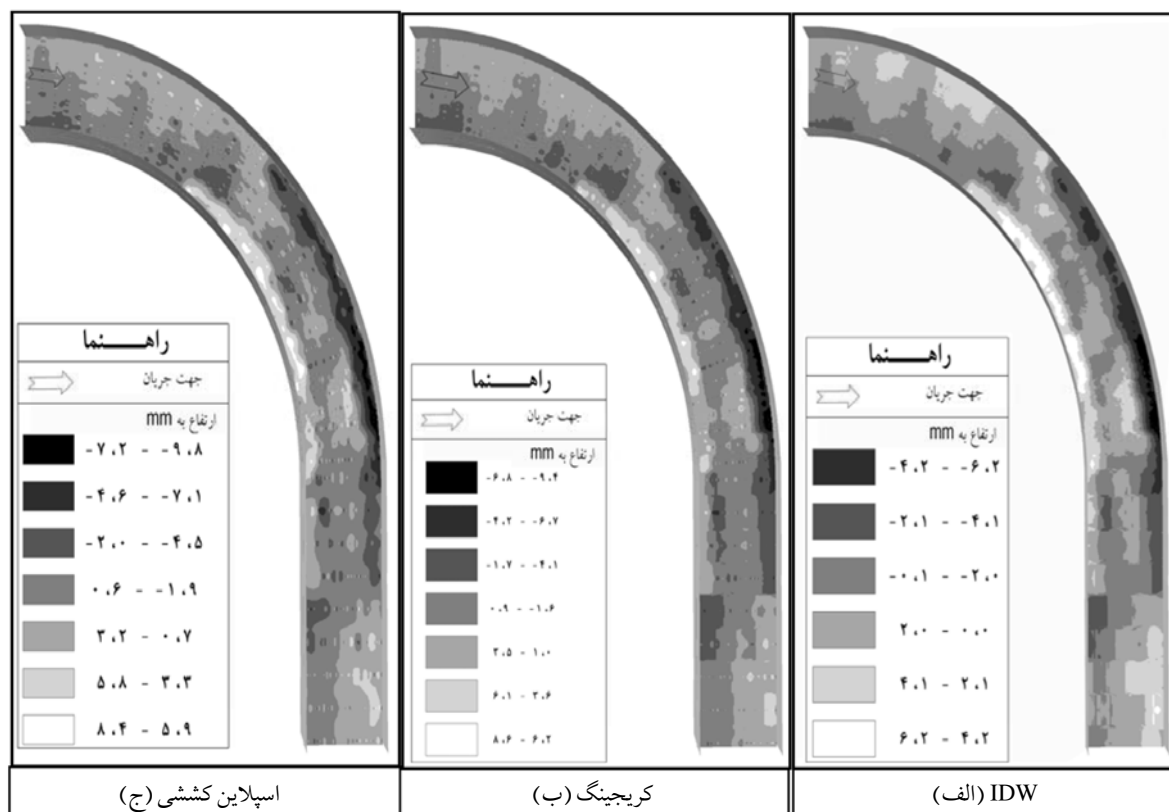
می باشد که دقت بیشتری نسبت به روش عکس فاصله دارد، به نظر می رسد به علت تغییرات موضعی کم، روش اسپلاین پیش بینی دقیق تری از توپوگرافی بستر داشته است و بیشتر روند کلی را مشخص می نماید. همچنین بیشترین مقدار آبشستگی در روش اسپلاین کششی

که در آن  $\hat{Z}(X_i)$  مقدار برآورد شده در نقطه ی  $X_i$ ،  $Z(X_i)$  مقدار مشاهده شده در نقطه ی  $X_i$  و  $n$  تعداد نقاط است. MAE معرف خطا است که هر چه به صفر نزدیکتر باشد، دقت روش مورد نظر مناسب تر است. مقدار MBE بیانگر میانگین انحراف است که می تواند مثبت و یا منفی باشد، به بیان دیگر مشخص می کند که مدل، متغیر مورد نظر را کم و یا زیاد برآورد می کند. از نظر تئوری هر گاه این دو مقدار برابر صفر شوند، نمایانگر این مطلب است که دقت روش صد در صد بوده و مقدار برآورد شده ی یک کمیت، دقیقاً برابر مقدار واقعی آن است [۶]. MAE خیلی شبیه به خطای مجذور مربع میانگین (RMSE) می باشد، اما حساسیت کمتری به خطای پیش بینی بالا دارد.

## نتایج

### قوس بدون آبشکن

ابتدا درون یابی توپوگرافی بستر با استفاده از روش های وزن دهی عکس فاصله، کریجینگ و اسپلاین کششی در قوس بدون آبشکن انجام پذیرفت که در شکل (۴) ارائه شده است، نتایج نشان می دهد که در روش کریجینگ بیشترین مقدار آبشستگی و بالاترین پشته ی رسوبی به ترتیب ۹/۴- و ۸/۶ است که با داده های آزمایشگاهی از نظر مکانی و مقدار (بیشترین آبشستگی و بالاترین پشته رسوبی به ترتیب ۱۰- و ۹ میلی متر) نزدیک ترین حالت است. مقادیر خطای



شکل ۴- الگوی توپوگرافی بستر در قوس بدون آبشکن با روش های گوناگون

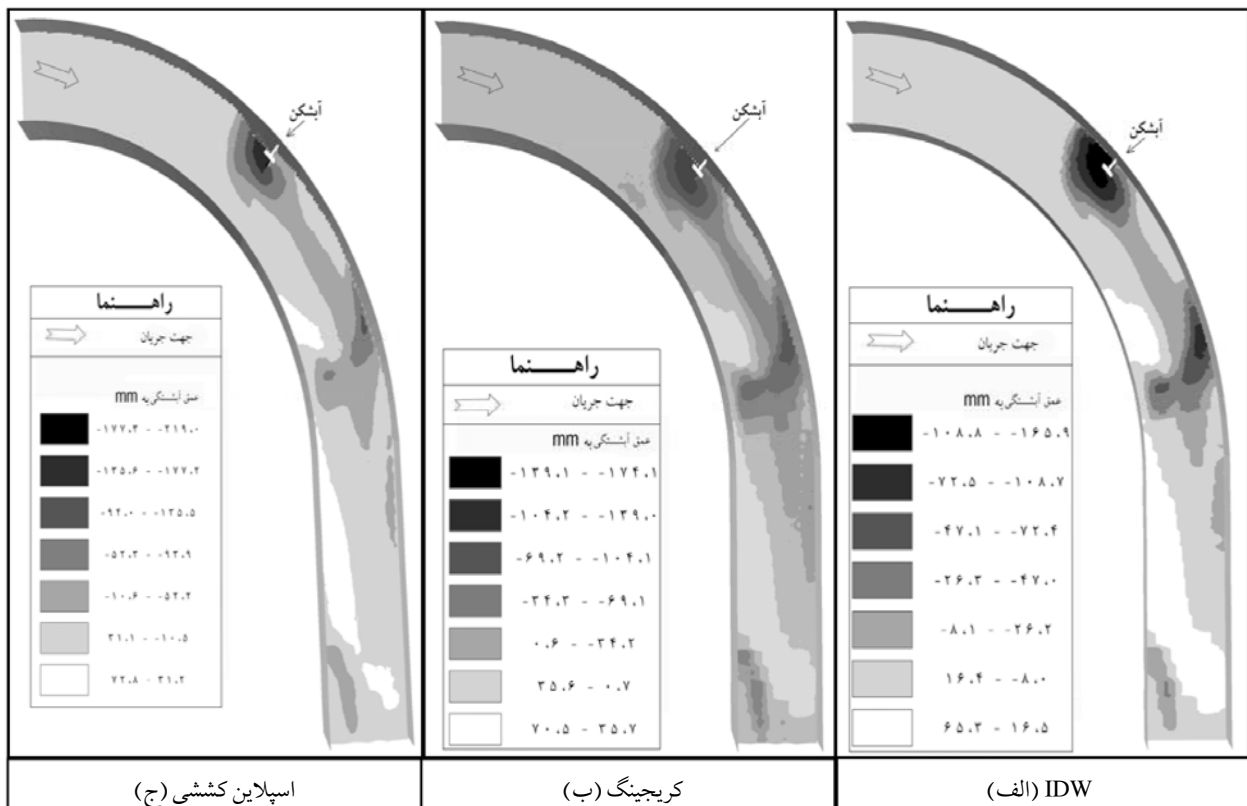
۹/۸- میلی متر و بالاترین پشته رسوبی در حدود ۸/۴ میلیمتر می باشد که از نظر مکانی و دقت پیش بینی عملکرد بهتری نسبت به روش عکس فاصله دارد، ولی در مجموع روش کریجینگ دقیق ترین پیش بینی را انجام داده است. به نظر می رسد که مدل کروی استفاده شده در نیم تغییر نما به خوبی توانسته ساختار فضایی و تغییرپذیری نمونه ها را مدل نماید. روش وزن دهی عکس فاصله با معادله ی درجه ۲ و استفاده از ۱۵ همسایه ی معلوم، نقاط مجهول را درون یابی نموده است. با توجه به این که این روش بدون در نظر گرفتن ساختار و تغییرپذیری فضایی، به محاسبه ی مجهول و وزن دهی همسایه ها صرفاً بر اساس فاصله ی آنها می پردازد، مقادیر آبشستگی بیشینه و بالاترین پشته ی رسوبی در قوس بدون آبشکن (شکل ۴ الف)) به ترتیب ۶/۲- و ۶/۲ میلی متر می باشد که دقت کمتری نسبت به دیگر روش ها نشان می دهد.

### قوس با آبشکن

سطوح درون یابی شده تغییرات توپوگرافی بستر قوسی با آبشکن شکل در ساحل خارجی در شکل ۵ ارائه شده است. نتایج بدست آمده از روش های درون یابی توپوگرافی بستر نشان می دهد که روش کریجینگ بیش ترین مقدار آبشستگی را در بالادست آبشکن، در حدود ۱۷۴/۱- میلی متر و مرتفع ترین پشته ی رسوبی در ساحل داخلی کانال در حدود ۷۰/۵ میلی پیش بینی کرده است که از نظر مکانی و مقدار، با داده های آزمایشگاهی (بیش ترین آبشستگی

۱۷۵- میلی متر و بالاترین پشته ی رسوبی ۷۱ میلی متر) بیشترین تطابق را دارد. روش وزن دهی عکس فاصله با معادله ی درجه ی ۲ و استفاده از ۱۵ همسایه ی معلوم نقاط مجهول را درون یابی نموده است. با توجه به اینکه این روش بدون در نظر گرفتن ساختار و تغییرپذیری فضایی، به محاسبه ی مجهول و وزن دهی همسایه ها صرفاً بر اساس فاصله ی آنها می پردازد، مقادیر آبشستگی بیشینه و بالاترین پشته ی رسوبی در قوس با آبشکن (شکل ۵ الف)) به ترتیب ۱۶۵/۹- و ۶۵/۳ میلی متر می باشد، این مقادیر نشان دهنده ی برتری روش IDW در قوس با آبشکن نسبت به اسپلاین بوده، در حالی که از روش کریجینگ پیش بینی کمتری دارد. شکل ۵ ج) روش اسپلاین کشتی را نشان می دهد که با وزن ۰/۱ صرفاً روند تغییرات توپوگرافی بستر را نشان داده است. با این روش بیش ترین میزان آبشستگی در بالادست آبشکن، حدود ۲۱۹- میلی متر و مرتفع ترین پشته رسوبی در ساحل داخلی کانال در حدود ۷۲/۸ میلی متر می باشد. روشن است که مقادیر پیش بینی شده بیشتر از مقادیر واقعی است. دلیل این امر این است که اسپلاین کشتی تنها سطح روند را بهتر نشان می دهد و در تعیین تغییرات موضعی توپوگرافی ناتوان است.

جدول (۲) میزان خطای مطلق میانگین، خطای اریب میانگین و خطای مجذور مربع میانگین را برای روش های درون یابی در قوس با آبشکن نشان می دهد که در روش اسپلاین به ترتیب برابر ۲/۷، ۰/۱۸ و ۳ می باشد. مقادیر خطای مطلق میانگین، خطای اریب



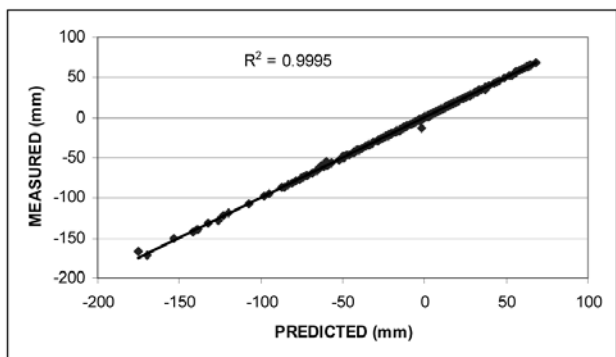
شکل ۵- الگوی توپوگرافی بستر در قوس همراه با آبشکن با روش های گوناگون

نزدیک ترین پیش بینی نسبت به مقادیر واقعی اندازه گیری شده می باشد. دلیل این امر به بهره گیری این روش از نیم تغییر نما و مدل کروی می باشد که ساختار فضایی و تغییر پذیری نمونه ها را نمایش می دهد که در این پژوهش برای تعیین تغییرات توپوگرافی بستر استفاده شده است. در روش IDW این مقادیر، از روش کریجینگ بدتر و از روش اسپلاین بهتر می باشد.

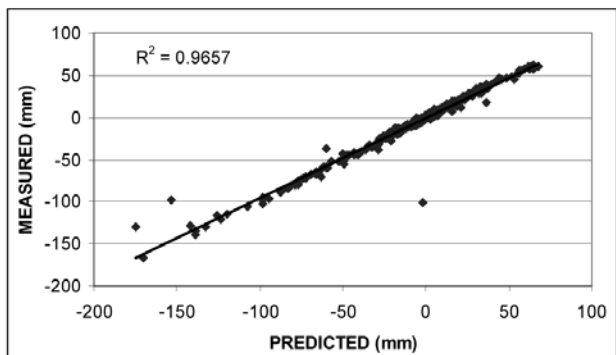
ضریب همبستگی  $R^2$  بین داده های اندازه گیری و پیش بینی شده در روش کریجینگ (شکل ۶) حدود ۰/۹۹۹۵ می باشد که بیش ترین مقدار بین روش های درون یابی است. شکل (۷) ضریب همبستگی مقادیر پیش بینی شده در روش اسپلاین و مقادیر اندازه گیری شده را نشان می دهد، مقدار  $R^2$ ، ۰/۹۷۲ می باشد که

میانگین و خطای مجذور مربع میانگین در روش کریجینگ به ترتیب برای قوس با آبشکن ۱/۶، ۰/۱ و ۱/۸ می باشد، مقادیر کمتر نشانه ی اعتبار بیشتر مدل می باشد، همچنان که جدول (۲) نشان می دهد، روش کریجینگ نسبت به دیگر روش ها، کمترین مقدار را دارد. این مقادیر در روش IDW به ترتیب ۲/۴، ۰/۱۵ و ۲/۹ می باشد که به ترتیب از روش کریجینگ و اسپلاین ارزیابی بدتر و بهتری داشته است.

همان گونه که جدول (۳) نشان می دهد، طول حفره ی آبشستگی در بالادست، پایین دست و عرض حفره ی آبشستگی در جلوی آبشکن در روش کریجینگ به ترتیب ۳۸۴mm، ۲۸۰۰mm و ۴۳۶/۵mm برآورد شده است، این مقادیر نشان دهنده ی



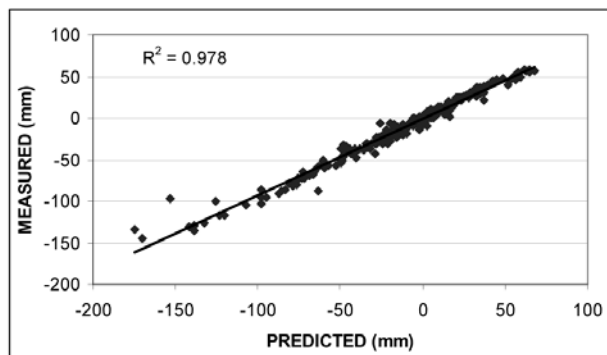
شکل ۶- ضریب همبستگی در روش کریجینگ با آبشکن



شکل ۸- ضریب همبستگی در روش IDW با آبشکن

جدول ۲- ارزیابی روش های درون یابی در قوس با آبشکن

روش های درون یابی	MAE	MBE	RMSE
کریجینگ با آبشکن	۱/۶	۰/۱	۱/۸
IDW با آبشکن	۲/۴	۰/۱۵	۲/۹
اسپلاین کثشی با آبشکن	۲/۷	۰/۱۸	۳



شکل ۷- ضریب همبستگی در روش اسپلاین با آبشکن

جدول ۳- مقایسه ی پارامترهای آبشستگی اطراف آبشکن در روش های درون یابی و مقادیر واقعی

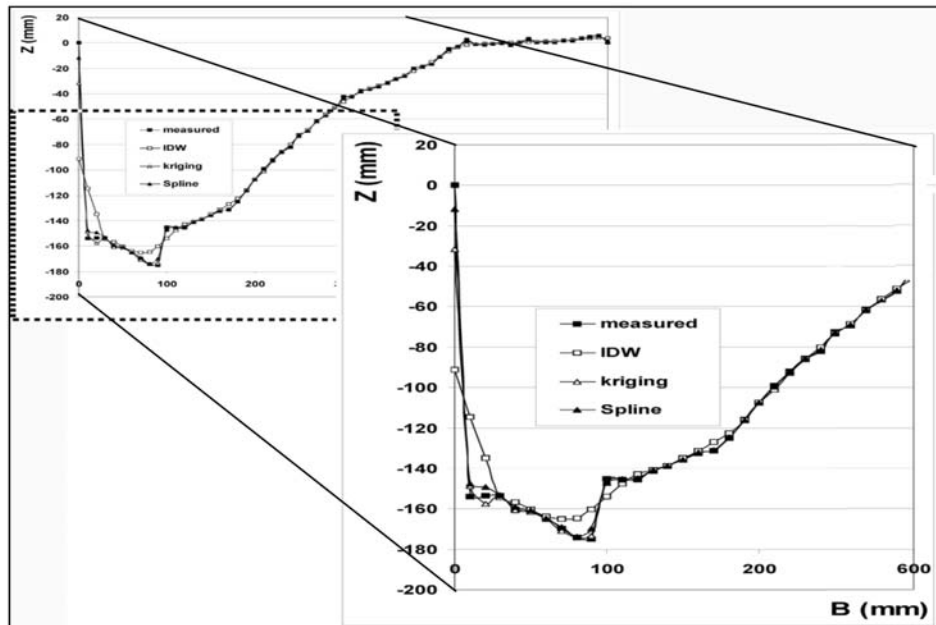
گودال آبشستگی	طول حفره ی آبشستگی در بالادست (mm)	طول حفره ی آبشستگی در پایین دست (mm)	عرض حفره ی آبشستگی در جلوی آبشکن (mm)
IDW	۳۷۵/۵	۲۷۰۰	۳۸۸
کریجینگ	۳۸۴	۲۸۰۰	۴۳۶/۵
اسپلاین کثشی	۳۷۰	۲۶۶۴	۳۴۰
مقادیر واقعی	۳۸۰	۲۸۵۰	۴۳۰

نسبت به روش کریجینگ و روش IDW به ترتیب از دقت پایین تر و بالاتری برخوردار است. ضریب همبستگی  $R^2$  در روش IDW (شکل ۸) با ۰/۹۶۵۷ دقت کمتری از دو روش دیگر دارد.

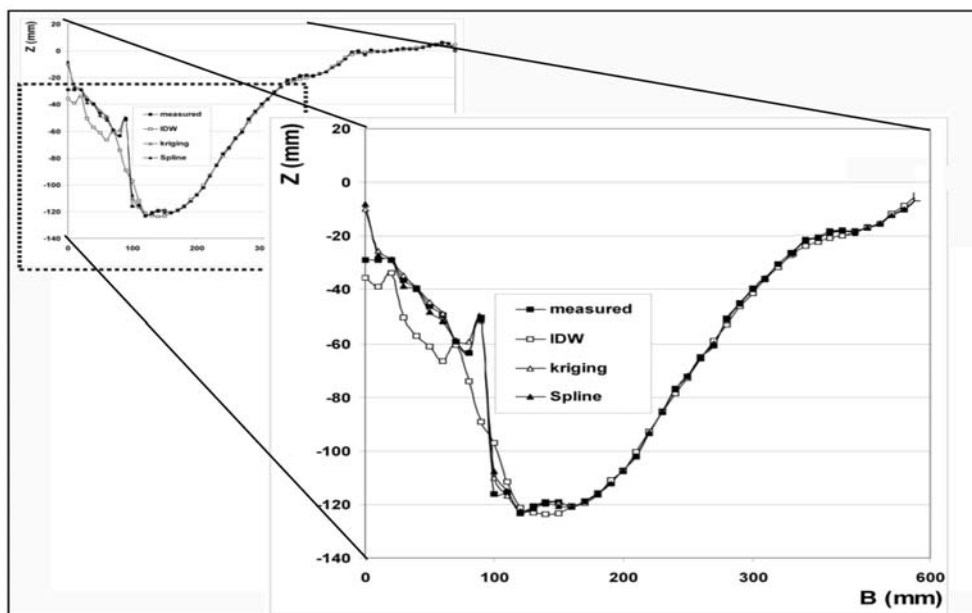
مقایسه‌ی روش‌های گوناگون در پیش‌بینی تغییرات بستر را در دو مقطع عرضی، ۴۴/۵ درجه، در فاصله‌ی ۰/۲۵ طول آبشکن بالادست (شکل ۹) و مقطع ۴۵/۵ درجه در پایین دست آبشکن (شکل ۱۰) می‌توان مشاهده نمود. شکل (۹) نشان‌دهنده‌ی دقت کمتر روش IDW به ویژه در پیش‌بینی عمق آبستگي نسبت به دو روش دیگر است. روش اسپلاین نیز روند تغییرات را به خوبی

پیش‌بینی نموده، اما از پیش‌بینی تغییرات موضعی به دلیل خاصیت هموارکنندگی، عاجز است. همچنین، در شکل ۱۰ به ترتیب روش کریجینگ و اسپلاین عملکرد بهتری در پیش‌بینی توپوگرافی بستر داشتند، در حالی که روش IDW در این زمینه پیش‌بینی دقیقی نداشته است.

همچنین برای بررسی تغییرات طولی بستر دو مقطع در فاصله‌ی ۳۰ و ۶۰ میلی‌متری از قوس خارجی کانال، ترسیم شد و مقادیر واقعی اندازه‌گیری شده با مقادیر پیش‌بینی شده به وسیله‌ی روش‌های درون‌یابی مقایسه شد که نتایج نشان می‌دهد (شکل‌های

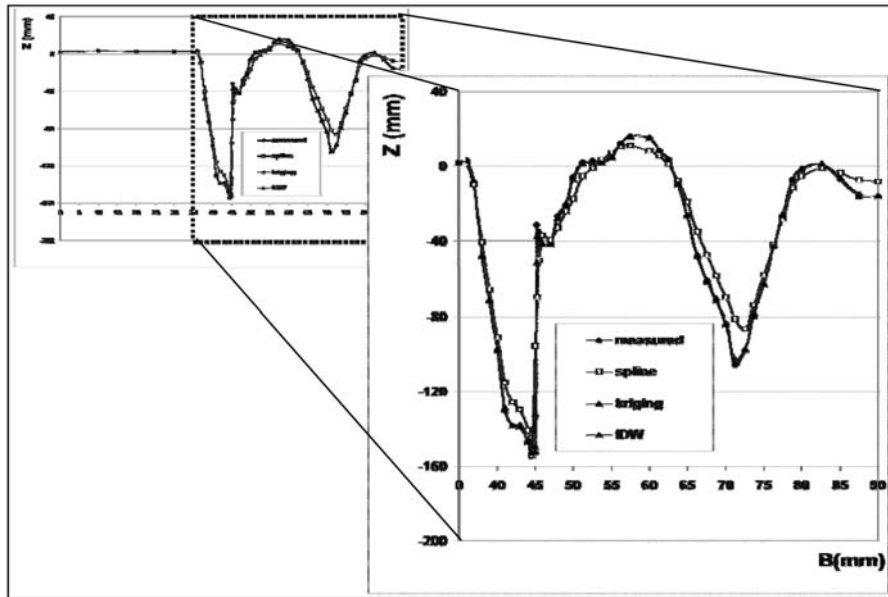


شکل ۹- مقطع عرضی قوس با آبشکن در موقعیت ۴۴/۵ درجه

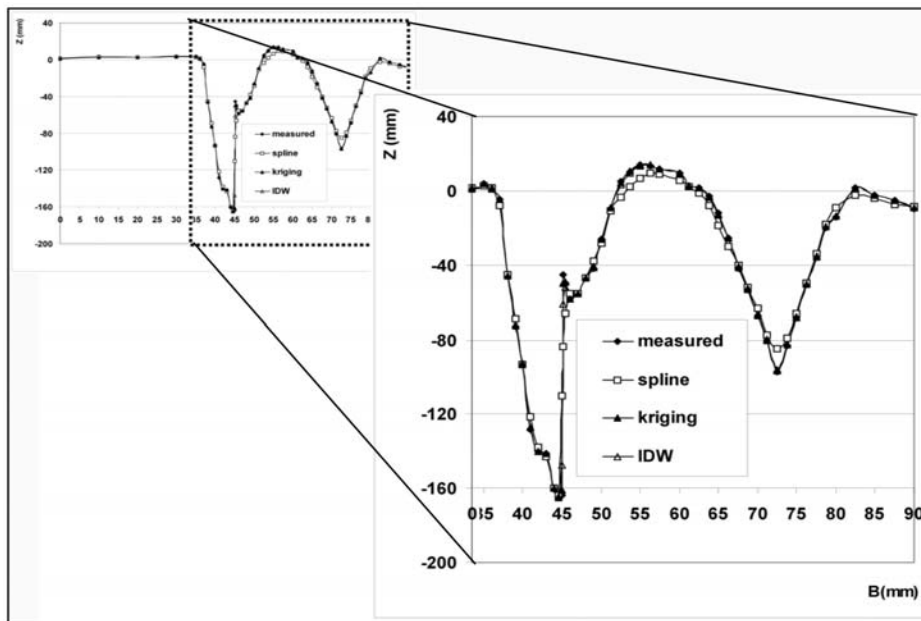


شکل ۱۰- مقطع عرضی قوس با آبشکن در موقعیت ۴۵/۵ درجه





شکل ۱۱- مقطع طولی قوس با آبشکن در فاصله ی ۳۰ میلی متری از قوس خارجی



شکل ۱۲- مقطع طولی قوس با آبشکن در فاصله ی ۶۰ میلی متری از قوس خارجی

IDW، کریجینگ و اسپلاین کششی در بررسی توپوگرافی بستر کانال های قوسی مورد ارزیابی قرار گرفت. دقت روش های درون یابی با استفاده از روش اعتباریابی متقاطع و پارامترهای آماری خطای میانگین مطلق و خطای اریب میانگین بررسی شدند. نتایج پژوهش نشان می دهد که روش کریجینگ برای مطالعه ی توپوگرافی بستر در رودخانه های قوسی دارای دقتی بیشتر است و سطوح تهیه شده با استفاده از این روش بیشترین انطباق را با الگوی واقعی توپوگرافی بستر دارد که میزان  $R^2$  با مقدار  $0.999$  این مطلب را تایید می نماید. در مجموع مقدار خطای اریب میانگین، خطای مطلق میانگین و خطای مجذور مربع میانگین در کریجینگ کمترین

۱۱ و ۱۲)، مقادیر برآورد شده عمق آبستگي و ارتفاع پشته ی رسوبي در روش کریجینگ مطابقت بیشتری با داده های واقعی اندازه گیری شده دارد و تأیید کننده ی این مطلب است که نیم تغییرنمای کروی استفاده شده ساختار فضایی، تغییرات آبستگي را در طول بستر به خوبی مدل سازی نموده است. روش های وزن دهی عکس فاصله و اسپلاین به دلیل عدم مدل سازی ساختار و تغییرات فضایی دقت کمتری در پیش بینی آبستگي در طول بستر دارند.

### نتیجه گیری

در این پژوهش روش های گوناگون درون یابی شامل

Large, A.R.G. and Milan, D.J. 2003. Geostatistical analysis of ground-survey elevation data to elucidate spatial and temporal river channel change. *Earth Surface Processes and Landforms* 28 (4), 349-370.

13- Ghodsian, M. and Mousavi, S.K. 2006. Experimental Study on Bed Scour in a 90 Channel Bend, *International Journal of Sediment Research*, Vol. 21, No.4, pp: 321-328.

14- Kuhnle, R.A., Alonso, C.V. and Shields, F.D. 1999. Geometry of Scour Holes Associated with 90 Spur Dikes. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol: 125, No.9.

15- Legleiter, C.J., Phelps, T.L. and Wohl, E.E. 2006. Geostatistical analysis of the effects of stage and roughness on reach-scale spatial patterns of velocity and turbulence intensity. *Geomorphology* 83: 322-345.

16- Me´ar, Y., Poizot, E., Murat, A., Lesueur, P. and Thomas, M. 2006. Fine-grained sediment spatial distribution on the basis of a geostatistical analysis: Example of the eastern Bay of the Seine (France). *Continental Shelf Research* 26: 2335-2351.

17- Merwade, V.M., Maidment, D.R. and Goff, J.A. 2006. Anisotropic considerations while interpolating river channel bathymetry. *Journal of Hydrology*, Vol. 331, Issues 3-4, pp: 731-741.

18- Odgaard A.J. 1984. Flow bed Topography in Alluvial channel Bed, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, and Vol: 111, No 110.

19- Odgaard, A.J. 1986. Meander Flow Model. I: Development. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 112, No. 12.

20- Ole, E.T. and Wolfgang, S., (ZAMG). 2002. Applications of spatial interpolation of climatological and Meteorological elements by the use of geographical information, *COST 719*: 1-45.

21- Spanning, M. 2000. Degradation of the River Bend After Building of Groynes. *Technische University Munchen, Germany*.

مقدار و در اسپلاین بیشترین مقدار می باشد. همچنین روش کربجینگ در پیش بینی ابعاد چاله، عمق آبشستگی و ارتفاع پشته رسوبی به دلیل مدل سازی ساختار و تغییرات فضایی توپوگرافی بستر با استفاده از نیم تغییرنما، نسبت به دو روش دیگر دقتی بهتر دارد.

## منابع

۱- اختری، ر.، مهدیان، م.ح. و مرید، س. ۱۳۸۵. تحلیل مکانی خشکسالی SPI و EDI در استان تهران، تحقیقات منابع آب ایران، سال دوم، شماره ۳، صص ۲۷-۳۸.

۲- حسینی پاک، ع.ا. تابستان ۱۳۷۷. کاربرد روش های زمین آمار در حوضه های آبریز؛ دانشگاه تهران.

۳- شش انگشت، س.، علیمحمدی، ع. و سلطانی، م.ج. ۱۳۸۲. ارزیابی مدل های زمین آماری در GIS برای تهیه نقشه فرسایندهای باران در حوزه آبخیز لتیان.

۴- دلبری، م.، خیاط خلقی، م. و مهدیان، م.ح. ۱۳۸۳. ارزیابی روش های زمین آمار در برآورد هدایت هیدرولیکی خاک در مناطق شیب آب و پشت آب پایین دشت سیستان، مجله علوم کشاورزی، جلد ۳۵ شماره ۱، صص ۱-۱۲.

۵- دهقانی، ا.ا.، قدسیان، م.، صالحی نیشابوری، س.ع.ا. و شفیعی فر، م. ۱۳۸۶. بررسی تغییرات بستر کانالهای آبرفتی در قوس ۱۸۰ درجه، هیدرولیک، صص ۱-۱۶.

۶- فرجی سبکبار، ح. و عزیزی، ق. ۱۳۸۵. ارزیابی میزان دقت روش های درون یابی فضایی (مطالعه موردی: الگوسازی بارندگی حوزه کارده مشهد)، پژوهش های جغرافیایی، شماره ۵۸، صص ۱-۱۵.

۷- قهرودی تالی، م. ۱۳۸۱. ارزیابی درون یابی به روش کربجینگ، پژوهش های جغرافیایی، شماره ۴۳، تهران، صص ۹۵-۱۰۸.

۸- مهدیان، م.ح. ۱۳۸۳. کاربرد زمین آمار در زهکشی، سومین کارگاه فنی زهکشی. ۷۵-۹۴.

۹- طباطبایی، س.م.ر.، مجیدی، م.ر. و روغنی، م. ۱۳۸۷. ترمیم شبکه های آبراهه ای رقومی گسسته با توسعه مدل شیء گرا در محیط GIS، مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، سال دوم، شماره ۴، ۳۸-۴۸.

۱۰- وفاخواه، م.، محسنی ساروی، م.، مهدوی، م. و علوی پناه، س.ک. ۱۳۸۷. کاربرد زمین آمار در برآورد عمق و چگالی برف در حوزه آبریز اورازان، مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، سال دوم، شماره ۴، ۶۵-۵۶.

11- Berge, M.A. 1990. Flow processes in a curved Alluvial channel, phd. Thesis in Iowa University, VSA, 365p.

12- Chappell, A., Heritage, G.L., Fuller, I.C.,