

Suspended Sediment Load Estimation Using
Geostatistics
Case Study: Talkherood River, Tabriz

V. Nourani¹, N. Talebbeydokhti²,
M. J. Abedini³, G. R. Rakhshandehroo³

Abstract

Due to the importance of sediment hydraulics in river engineering and its effects on hydraulics structures, the reliable estimation of the suspended sediment load plays very important role in real and reliable study. Because of some shortages such as technical and economical problems, the data from many sediment-gauging stations in national rivers can not be relied on. Rational data is therefore necessary for some reaches. In this study, geostatistics and concepts of spatial variables were used in order to find a model for estimation of Talkherood suspended sediment load. For this purpose, a pre-developed software named "Gslib" was used and then estimation of the suspended load of Talkherood River was carried out by both Kriging and Cokriging methods. In Cokriging method, in addition to suspended load, water discharge is also used as a secondary variable. This variable has a statistical relation with suspended load. Talkherood River is the most important river in the northern-west of Iran. In this study, the data of 5 hydrographic stations were used for suspended load estimation of Talkherood using both Kriging and Cokriging methods. For verification of the presented model, cross validation method was used. The result showed that proposed model could be adequately used for estimation of Talkherood suspended load. Two important points raised from the obtained results are as follows:
Gaussian Variogram model for spatial estimation of Talkherood suspended sediment load has the best fitting on the experimental Variograms and the result of Cokriging method, in which the discharge is used as a secondary and parameter and compared to the Kriging method.

Keywords: Geostatistics, Suspended Load, Spatial Estimation, Cokriging

1- Ph.D. Student, Dept. of Civil Eng., Faculty of Eng., Shiraz University
2- Professor, Dept. of Civil Eng., Faculty of Eng., Shiraz University
3- Assistant Professor, Dept. of Civil Eng., Faculty of Eng., Shiraz University

تخمین بار رسوبی معلق با استفاده از زمین آمار،
مطالعه موردی تلخه رود تبریز

وحید نورانی^۱، ناصر طالب بیدختی^۲، محمدجواد عابدینی^۳،
غلامرضا رخشنده رو^۳

چکیده

نظر به اهمیت بالای هیدرولیک رسوب در مهندسی رودخانه و تاثیر آن روی سازه‌های هیدرولیکی بنا شده روی رودخانه، مطالعه دقیق و برآورد صحیح میزان بار رسوب عبوری از مقاطع مختلف یک رودخانه نقش بسزایی در پیشبرد صحیح مطالعات مهندسی رودخانه خواهد داشت، ولی معمولاً بعلت وجود مشکلات فنی و اقتصادی امکان احداث و بهره‌برداری از ایستگاههای رسوب سنجی در مقاطع مختلف از بازه رودخانه وجود نداشته و لازم است برای آن مقاطع با استفاده از آمار ایستگاههای موجود اقدام به داده‌سازی منطقی شود. در این مطالعه با استفاده از علم ژئواستاتستیک^۱ و مفهوم متغیرهای مکانی اقدام به تعیین مدل برآورد مکانی بار معلق برای شاخه اصلی تلخه رود تبریز گردید. برای این منظور با استفاده از نرم‌افزار Gslib علاوه بر تخمین چند پارامتری کوکریجینگ^۲ با استفاده از دبی جریان به عنوان پارامتر کمکی، برای مقایسه، تخمین تک پارامتری کریجینگ نیز صورت گرفت. نتایج حاصل حاکی از مناسب بودن مدل گوسی به عنوان مدل واریوگرام برآورد مکانی بار معلق تلخه‌رود بود و همچنین ملاحظه گردید که در برآورد بار معلق، روش کوکریجینگ در مقایسه با روش کریجینگ نتایج بهتری ارائه می‌دهد.

کلمات کلیدی: ژئواستاتستیک (زمین آمار)، بار معلق، برآورد مکانی، تخمین چند پارامتری (کوکریجینگ)

۱- دانشجوی دکترای عمران - آب، دانشکده مهندسی، دانشگاه شیراز
nourani@tabrizu.ac.ir
۲- استاد بخش مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه شیراز
taleb@shirazu.ac.ir
۳- استادیار بخش مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه شیراز
abedini@shirazu.ac.ir

در این مقاله سعی در استفاده از این روش برای برآورد مکانی میزان بار معلق عبوری از مقاطع مختلف رودخانه تلخه رود تبریز را داشته و برای نیل به این هدف از بار معلق عبوری از هر مقطع به عنوان متغیر مکانی اصلی و از میزان دبی آب عبوری نیز به عنوان متغیر مکانی فرعی (کمکی) استفاده می گردد.

۲- برآورد مکانی به روشهای کریجینگ و کوکریجینگ

ساده ترین روش تخمین در ژئواستاتستیک کریجینگ است، در این روش با توجه به نحوه توزیع مکانی متغیر مورد نظر به تخمین مقادیر مجهول در موقعیت های مکانی مطلوب و معلوم پرداخته می شود. در صورتیکه مقدار متغیر مکانی Z در موقعیت های مکانی \bar{x}_i معلوم باشد مقدار تخمینی برای مجهول Z در موقعیت معلوم \bar{x}_0 را می توان بصورت ترکیب خطی زیر در نظر گرفت:

$$Z(\bar{x}_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(\bar{x}_i) \quad (1)$$

که n تعداد نقاطی است که مقدار Z در آن نقاط معلوم می باشد. حال اگر مقدار Z واقعی (غیرقابل دسترس) در \bar{x}_0 ، $\hat{Z}(\bar{x}_0)$ باشد خطای تخمین برابر با تفاضل $\hat{Z}(\bar{x}_0)$ و $Z(\bar{x}_0)$ خواهد بود. با اعمال دو شرط میانگین خطای تخمین صفر و حداقل واریانس خطای تخمین، می توان به ترتیب به روابط زیر رسید (Isaaks and Srivastava, 1989):

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 & (1-2) \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j R(\bar{x}_i, \bar{x}_j) + \mu = R(\bar{x}_i, \bar{x}_j) & i = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (2-2)$$

از حل این دستگاه $n+1$ معادله می توان n مقدار λ_i و مقدار μ را که ثابت لاگرانژ می باشد محاسبه و سپس با استفاده از رابطه (۱) مقدار $\hat{Z}(\bar{x}_0)$ را تخمین زد. در رابطه (۲-۲)، $R(\bar{x}_i, \bar{x}_j)$ تابع کوواریانس^۴ متغیر Z در موقعیت مکانی \bar{x}_i, \bar{x}_j بوده و از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$R(\bar{x}_i, \bar{x}_j) = E[(z(\bar{x}_i) - m(\bar{x}_i))(z(\bar{x}_j) - m(\bar{x}_j))] \quad (3)$$

$$m(\bar{x}_j) = E[Z(\bar{x}_j)], m(\bar{x}_i) = E[Z(\bar{x}_i)]$$

که بیانگر مقادیر میانگین و $E []$ نیز تابع امید ریاضی است. در صورت ایستا بودن توابع تصادفی می توان نوشت (Isaaks and Srivastava, 1989):

اصولاً یکی از مشکلات عمده ای که سازه های هیدرولیکی بنا شده در یک رودخانه را مورد تهدید قرار می دهد مسئله انتقال و انباشت رسوبات می باشد که در صورتیکه قبل از احداث سازه بطور دقیق مورد مطالعه و موشکافی قرار نگیرد می تواند منجر به کاهش کارایی و بازده تاسیسات احداث شده گردد، به همین دلیل لازم است مطالعه دقیقی با استفاده از روش های تخمین متعدد روی مسئله هیدرولیک رسوب انجام گیرد و تاکنون نیز برای جبران عدم وجود داده های لازم برای یک ایستگاه روشهای مختلفی ارائه شده است که با توجه به درصد بالای میزان بار معلق در بار کل رسوبی اکثر این روشها برای برآورد بار معلق انتقال یافته مورد استفاده قرار می گیرند (رستمی و اردشیر، ۱۳۸۰). اخیراً در این زمینه علاوه بر روشهای کلاسیک موجود، روش های تخمین نوپا مثل روش شبکه های عصبی مصنوعی نیز مورد استفاده قرار گرفته است (آوریده و همکاران، ۱۳۸۰). تمامی روش های ذکر شده روی تخمین میزان بار معلق در یک ایستگاه در زمانهای مختلف و تحت جریانهایی مختلف تمرکز داشته و در واقع این نوع تخمین مستلزم داشتن ایستگاه در مقطع مورد نظر و در دست بودن آمار مربوطه می باشد، ولی در عمل بعلت وجود محدودیتهای فنی، اقتصادی و نیروی ماهر امکان احداث ایستگاه رسوب سنجی و بهره برداری از آن فقط در چند نقطه محدود از بازه رودخانه وجود داشته و در صورتیکه به سبب مسائل مهندسی نیاز به دانستن میزان بار معلق در یک مقطع خاص از رودخانه باشد، لازم است که با استفاده از اطلاعات سایر ایستگاهها اقدام به داده سازی منطقی و برآورد مکانی برای مقطع مورد نظر گردد.

در طول شاخه اصلی یک رودخانه و بازه ای که رودخانه شاخه شاخه نشده است و در صورت نبود سیلاب ناگهانی با حرکت از بالا دست به پایین دست ازدیاد دبی جریان و میزان بار معلق انتقالی مشهود خواهد بود که این امر می تواند دلیلی مقدماتی برای وجود یک روند مکانی بین میزان دبی جریان با بار معلق عبوری از شاخه اصلی یک رودخانه باشد که بعداً وجود این روند بصورت ساختار ریاضی نیز ملاحظه خواهد شد. با توجه به این نکته می توان برای برآورد مکانی میزان بار معلق عبوری از یک رودخانه از علم ژئواستاتستیک و مفهوم متغیرهای مکانی استفاده کرد. متغیرهای مکانی برای اولین بار توسط ماترون^۳ پایه گذاری و مقدمتاً در مسائل مهندسی معدن مورد استفاده قرار گرفت، بعداً با گسترش این علم از آن در مهندسی آب و در زمینه آبهای زیرزمینی، هیدرولوژی، تخمین میزان بارش و ... استفاده به عمل آمد.

$$\gamma(\bar{x}_i, \bar{x}_j) = \sigma^2 - R(\bar{x}_i, \bar{x}_j) \quad (4)$$

که در این رابطه $\sigma^2 = R(\circ)$ واریانس متغیر مکانی است که به سیل^۵ نیز مشهور است و $2\gamma(\bar{x}_i, \bar{x}_j)$ نیز تابع واریوگرام^۶ بوده و به نصف آن سمیواریوگرام^۷ گویند. حال می‌توان رابطه (۲-۲) را با استفاده از رابطه (۴) برحسب واریوگرام نوشت در این حالت رابطه مستقل از میانگین (m) و واریانس (σ^2) بوده و می‌توان برای توابع تصادفی ذاتی^۸ نیز از آن استفاده نمود (Isaaks and Srivastava, 1989).

در صورتیکه موقع تخمین یک متغیر اصلی از یک یا چند متغیر فرعی دیگر که با متغیر اصلی در ارتباط باشند کمک گرفته شود روش تخمین موسوم به کوکریجینگ خواهد بود، اگر در اینجا فرض بر وجود فقط یک پارامتر مکانی فرعی $Z_2(\bar{x})$ در کنار پارامتر مکانی اصلی $Z_1(\bar{x})$ باشد مقدار نامعلوم $Z_1(\bar{x}_o)$ مشابه معادله (۱) بصورت زیر تخمین زده می‌شود:

$$Z_1(\bar{x}_o) = \sum_{i=1}^n \lambda_{1i} Z_1(\bar{x}_{1i}) + \sum_{j=1}^m \lambda_{2j} Z_2(\bar{x}_{2j}) \quad (5)$$

که n تعداد نقاط نمونه‌برداری از پارامتر اصلی و m تعداد نقاط نمونه‌برداری از پارامتر فرعی می‌باشند در این حالت شروط (۱-۲) و (۲-۲) به ترتیب بصورت زیر در خواهند آمد (Isaaks and Srivastava, 1989):

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \lambda_{1i} = 1 \\ \sum_{j=1}^m \lambda_{2j} = 0 \end{cases} \quad (1-6)$$

$$(2-6)$$

$$\begin{cases} 2 \sum_{j=1}^m \lambda_{1j} R_{11}(\bar{x}_{1i}, \bar{x}_{1j}) + 2 \sum_{j=1}^m \lambda_{2j} R_{12}(\bar{x}_{1i}, \bar{x}_{2j}) - 2R_{11}(\bar{x}_{1i}, \bar{x}_o) + 2\mu_1 = 0 & i=1, 2, \dots, n \\ 2 \sum_{i=1}^n \lambda_{2i} R_{22}(\bar{x}_{2i}, \bar{x}_{2j}) + 2 \sum_{i=1}^n \lambda_{1i} R_{12}(\bar{x}_{1i}, \bar{x}_{2j}) - 2R_{21}(\bar{x}_{2j}, \bar{x}_o) + 2\mu_2 = 0 & j=1, 2, \dots, m \end{cases}$$

که در این روابط R_{21} و R_{12} بیانگر کواریانس دو متغیر اصلی و فرعی نسبت به هم بوده و به کواریانس متقابل^۹ موسومند.

حال با حل $n+m+2$ معادله حاصل از روابط (۱-۶) و (۲-۶) می‌توان n عدد λ_1 ، m عدد λ_2 و ۲ عدد μ_1 و μ_2 را حساب و با رابطه (۵)

مقدار $Z_1(\bar{x}_o)$ را تخمین زد. در این حالت نیز می‌توان با استفاده از رابطه (۴) روابط را براساس γ نوشت. لازم به ذکر است که معادلات فوق برای حالت کوکریجینگ و کوکریجینگ عادی^{۱۰} می‌باشند.

روش‌های کوکریجینگ و کوکریجینگ دو مزیت مهم نسبت به سایر روش‌های تخمین دارند، اولاً در نقاطی که مقدار متغیر معلوم است مقدار دقیق برای متغیر تخمین زده می‌شود و ثانیاً برای هر مقدار تخمین زده شده می‌توان واریانس تخمین را نیز محاسبه کرد که این امر در آرایش و انتخاب محل‌های نمونه‌برداری مهم خواهد بود (حسینی پاک، ۱۳۷۷) و مقادیر μ حساب شده نیز در محاسبه واریانس تخمین کاربرد خواهند داشت.

در عمل برای تخمین یک پارامتر لازم است ابتدا واریوگرام تجربی داده‌های موجود رسم و سپس یک مدل واریوگرام مناسب بر واریوگرام تجربی برازش و در آخر بسته به مورد با استفاده از روابط (۱-۲) و (۲-۲) یا روابط (۱-۶) و (۲-۶) ضرایب تخمین تعیین و مقدار متغیر در موقعیت مکانی موردنظر برآورد شود.

هر چند پارامترهای مختلفی مثل قطر رسوبات، عمق متوسط، سرعت جریان، درجه حرارت و ... در میزان بار معلق عبوری از یک مقطع رودخانه دخالت دارند ولی آنالیزهای حساسیت صورت گرفته روی این پارامترها بیانگر آن است که هرچند از لحاظ فیزیکی بار معلق عبوری به میزان دسترسی به مواد رسوبی بستگی دارد، نه به قابلیت حمل جریان (دبی جریان) ولی از لحاظ آماری بار معلق به دبی آب عبوری حساسیت بیشتری نسبت به سایر پارامترها نشان می‌دهد (استاد علی عسکری و شفاعی بجنستان، ۱۳۷۷)، روی همین اصل است که در این مطالعه برای برآورد مکانی بار معلق تلخه رود از دبی جریان عبوری به عنوان متغیر فرعی استفاده گردید و از آنجایی که در هر ایستگاه رسوب‌سنجی هر دو پارامتر اصلی و فرعی قابل اندازه‌گیری بوده و در دسترس می‌باشند نمونه‌برداری برای تخمین کوکریجینگ از نوع ایزوتوپیک^{۱۱} بوده و در نتیجه $n=m$ خواهد بود (Isaaks and Srivastava, 1989).

۳- موقعیت جغرافیایی تلخه رود و داده‌های ایستگاههای رسوب‌سنجی آن

تلخه رود (آجی چای) به عنوان یکی از شریانهای حیاتی شمال غرب کشور محسوب شده و روی آن سازه‌های هیدرولیکی مختلفی از جمله سد و نیار در حال ساخت می‌باشد، این رود از کوه‌های سیلان سرچشمه گرفته و از شمال شرق شهر تبریز بطرف شمال غرب آن جریان یافته و در نهایت بعد از وارد شدن به دشت و شاخه شاخه

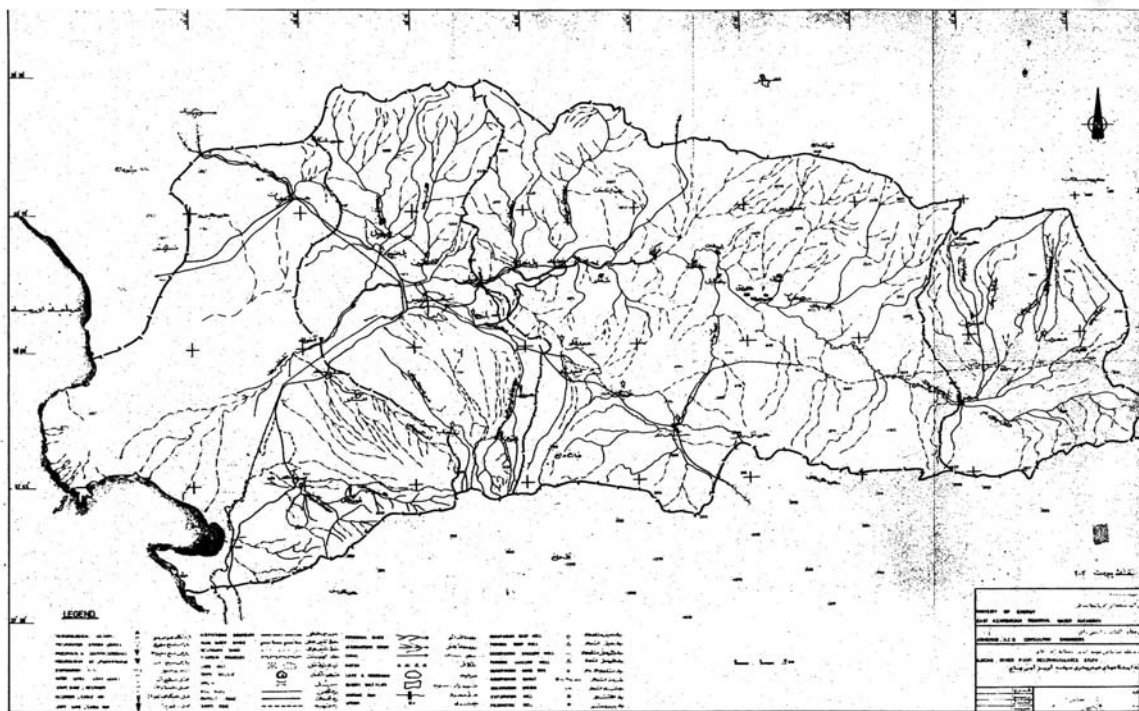
برآورد مکانی بار معلق تلخه رود داده‌های آماری پنج ایستگاه فعال کدام از ۵ ایستگاه مستقر روی شاخه اصلی تلخه‌رود داده‌های میانگین شده برای محدوده زمانی مذکور درج گردیده است. گفتنی است که برای جلوگیری از بروز مشکلات عددی در نرم‌افزار برآورد مکانی بعلت انجام محاسبات روی ارقام بزرگ، مقادیر دبی جریان و بار معلق بصورت تقسیم بر ده شده در جدول (۱) آورده شده و محاسبات روی آنها صورت گرفته، بدیهی است در این صورت جوابهای حاصل همگی تقسیم بر ده شده جوابهای اصلی خواهند بود.

با دقت در شکل (۱) ملاحظه می‌شود که بین دو ایستگاه سرانسر (ارزنق) و مرکید که مسیر طولانی از رودخانه را شامل می‌شود ایستگاه رسوب‌سنجی وجود نداشته و در صورت نیاز به داده‌های آماری در این منطقه لازم است که اقدام به داده‌سازی منطقی در این محدوده گردد و این امر خود بر نیاز داشتن به انجام برآورد مکانی در طول تلخه رود دلالت می‌کند.

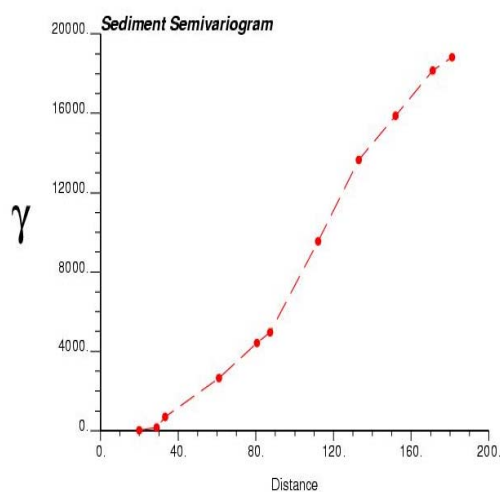
شدن وارد دریاچه ارومیه می‌گردد (شکل (۱)). برای تعیین مدل موجود روی شاخه اصلی رودخانه در فاصله زمانی سال ۱۳۷۹ تا اواسط سال ۱۳۸۱ از سازمان آب منطقه‌ای آذربایجان دریافت گردید. در برآورد مکانی لازم است مقادیر داده‌ای در یک زمان واحد مورد آنالیز قرار گیرند ولی چون عملاً اندازه‌گیریها در ایستگاههای رسوب‌سنجی از لحاظ زمانی نامنظم می‌باشند، با بررسی آمار مذکور سعی شد محدوده زمانی کوتاه مدتی که در آن محدوده در تمامی پنج ایستگاه اندازه‌گیری بار معلق و دبی جریان صورت گرفته باشد تعیین و سپس مقدار میانگین بار معلق و دبی جریان در آن محدوده زمانی برای هر ایستگاه به عنوان نماینده بار معلق و دبی جریان در نظر گرفته شود. این محدوده زمانی با ویژگی مطرح شده اواسط اردیبهشت ماه سال ۱۳۸۱ انتخاب گردید که هر چند در این محدوده زمانی سیلاب ناگهانی در رودخانه اتفاق نیفتاده بود ولی رودخانه دارای دبی نسبتاً بالایی بود. در شکل (۱) موقعیت مکانی ایستگاههای رسوب‌سنجی ملاحظه می‌شود و در جدول (۱) برای هر

جدول ۱- داده های اندازه گیری شده از ایستگاه های تلخه رود

مقدار مقیاس شده دبی جریان	یکدهم دبی جریان اندازه گیری شده (m ³ /s)	یکدهم بار معلق اندازه گیری شده (mg/lit)	فاصله طولی ایستگاه از مبدا (Km)	نام ایستگاه
۲۰/۸	۰/۶۵۳	۰/۸۲۴	۰	میرکوه (اسبقران)
۴۰/۹	۱/۲۸	۷/۸۵	۲۰	سرانسر (ارزنق)
۱۱۲	۳/۵	۱۱۰/۵	۱۰۱	مرکید
۱۵۸/۱	۴/۹۴	۱۶۹/۶	۱۴۳	ونیار
۱۸۱/۷	۵/۶۸	۱۹۴/۵	۱۸۱	آخوله



شکل ۱ - نقشه موقعیت مکانی تلخه رود

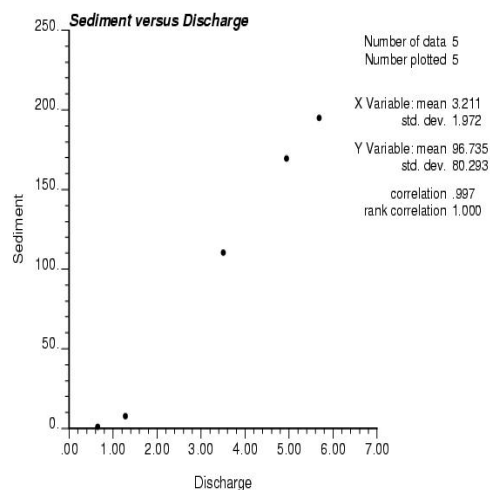


۴- محاسبه مدل برآورد مکانی بار معلق تلخه رود و تعیین صحت آن

قبل از هر اقدامی توجه به این نکته اساسی لازم است که با توجه به اینکه دو پارامتر دبی و بار معلق از لحاظ دیمانسیون باهم یکسان نبوده و اختلاف عددی بالایی دارند، موقع تعیین واریوگرام متقابل در روش کوکریجینگ مشکلاتی بروز خواهد کرد، در این قبیل موارد لازم است مقادیر پارامتر فرعی را با ضرب کردن در نسبت میانگین پارامتر اصلی به پارامتر فرعی تعدیل کرده و دو پارامتر را هم مقیاس نمود که این روند در تعیین مدل نهایی مشکلی ایجاد نخواهد کرد (Pan et al. , 1993). مقادیر دبی تعدیل شده در ستون آخر جدول (۱) درج شده است.

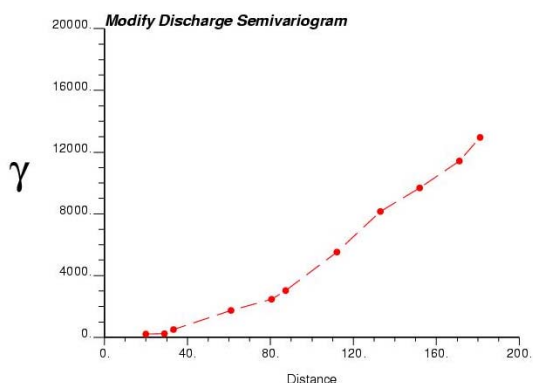
مطالعه برای تعیین مدل برآورد مکانی بار معلق از نرم افزار Gslib استفاده گردید، جزئیات عمل بدین صورت بود که ابتدا با رسم دیاگرام متقابل^{۱۲} دبی جریان - بار معلق در شکل (۲) به وجود روند رابطه‌ای بین این دو متغیر پی برده شد، سپس با استفاده از داده‌های موجود واریوگرام تجربی متغیر مکانی اصلی (بار معلق)، واریوگرام تجربی متغیر مکانی فرعی (دبی جریان) و واریوگرام متقابل تجربی بار معلق - دبی جریان ترسیم گردید که نتایج در شکل‌های (۳) و (۴) و (۵) آورده شده است.

در این



نرم افزار table curve بهره گرفته شد. نتایج بررسی حاکی از آن بود که از بین ۴ مدل استاندارد موجود در نرم افزار Gslib مدل گوسی بهترین تطابق را با واریوگرام های تجربی ترسیم شده دارد، این مدل با رابطه زیر مشخص می شود:

$$\gamma(h) = c[1 - \exp(-\frac{h^2}{a^2})] \quad (7)$$

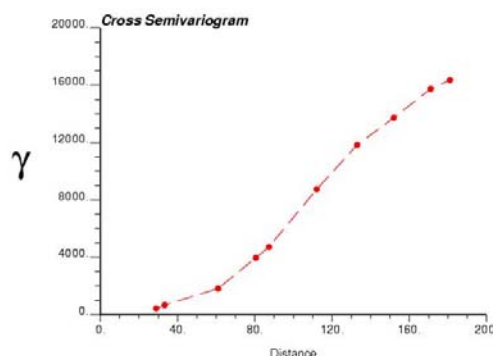


شکل ۴- واریوگرام تجربی دبی جریان مقیاس شده

ضرایب a و c در جدول (۲) آورده شده است و در شکل (۷) به عنوان نمونه مدل واریوگرام گوسی بار معلق برای محدوده وسیعی از h رسم گردیده است تا روند تجانب منحنی به سیل ملاحظه شود. در آخر با داشتن مدل واریوگرام های مذکور با استفاده از نرم افزار Gslib اقدام به برآورد مکانی بار معلق توسط روش کریجینگ و کوکریجینگ برای فواصل ۱۰ کیلومتری در طول رودخانه گردید، نتایج در جدول (۳ الف و ب) درج گردیده است.

با این عمل می توان برای مقاطع مختلف رودخانه مخصوصاً در فاصله بین دو ایستگاه سرناسر و مرکید که با نبود ایستگاه رسوب سنجی مواجه هستند، بار معلق رسوبی را تخمین زد. نکته مهم در برآورد بروش کوکریجینگ این است که اگر واریوگرام های انتخابی مناسب نباشند ماتریس تعیین ضرایب برای تخمین پارامتر اصلی معکوس ناپذیر بوده و مسئله جواب نخواهد داشت، برای گریز از این مشکل لازم است که ماتریس ضرایب مدل های تعیین شده مثبت و معین باشد (Isaaks and Srivastava, 1989) که برای مدل انتخابی، این شرط بصورت زیر برقرار شده است:

با دقت در این منحنی ها پی به این مسئله برده می شود که این منحنی ها در جهت مجانب شدن به مقدار ثابت سیل می باشند که این امر بصورت ریاضی اثبات کننده وجود یک روند ارتباطی بین متغیرهای مکانی می باشد (حسنی پاک، ۱۳۷۷). در مرحله بعدی یک مدل واریوگرام مناسب بر واریوگرام های تجربی برازش داده شد که برای این منظور از بین روشهای مختلف برازش، روش کمترین خطای مربعات (Cressie, 1985) انتخاب و برای انجام برازش از



شکل ۵- واریوگرام متقابل تجربی بار معلق - دبی جریان مقیاس شده

که در این رابطه γ سمیواریوگرام، h فاصله، $c = \sigma^2$ مقدار سیل و $a\sqrt{3}$ نیز محدوده اثر می باشد (Deutsch and Journel, 1992) که وقتی h به این محدوده می رسد تجانب واریوگرام به سیل آغاز می گردد.

در شکل (۶) به عنوان نمونه برازش واریوگرام مدل گوسی بار معلق به واریوگرام تجربی ارائه شده است، نتایج حاصل از نرم افزار table curve در برازش مدل به واریوگرام تجربی برای تعیین

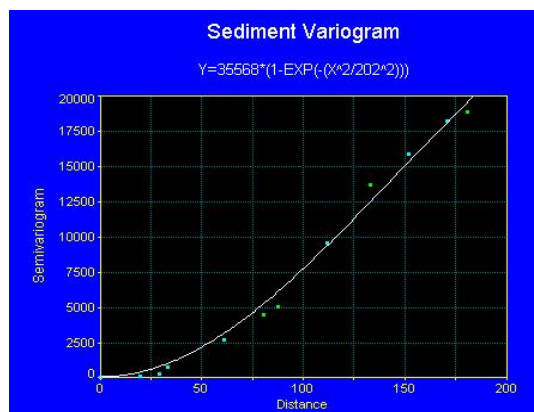
شکل ۷- واریوگرام مدل گوسی

$$\begin{vmatrix} c_1 & c_{12} \\ c_{21} & c_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 35568 & 28597 \\ 28597 & 43250 \end{vmatrix} > 0$$

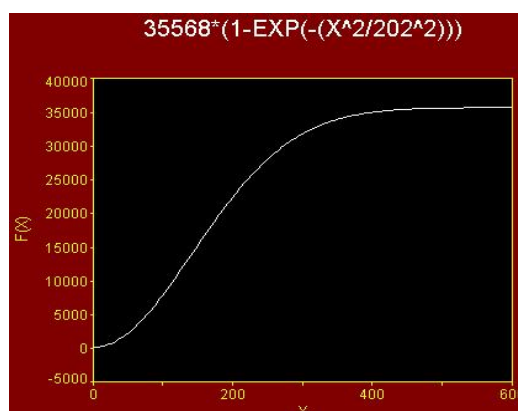
در واریوگرام‌های تجربی ترسیم شده در این تحقیق میزان اثر ناحیه‌ای^{۱۳} (عرض از مبدا واریوگرام) برای واریوگرام‌های دبی و بار معلق صفر ولی برای واریوگرام متقابل دبی جریان - بار معلق دارای یک مقدار ناچیز می‌باشد که با توجه به کم بودن مقدار آن در مقایسه با مقدار سیل می‌توان اثر آنرا در مدل واریوگرام در نظر نگرفت، ولی برنامه‌نویسی Gslib به نحوی است که بایستی شرط مثبت معین بودن ماتریس مقادیر اثرات ناحیه‌ای نیز برقرار باشد (Deutsch and Journal, 1992) که قرار دادن مقدار صفر به عنوان اثرات ناحیه‌ای باعث ایجاد مشکل در روند تخمین می‌گردد که می‌توان برای فرار از این مشکل مقادیر بسیار کوچکی مثل (۰/۱)، به عنوان اثرات ناحیه‌ای در تعریف مدل‌های واریوگرام‌های دبی و رسوب به برنامه متضمن شد. با بررسی‌های تکمیلی تر روی مدل‌های برازش داده شده به واریوگرام‌های تجربی با استفاده از نرم‌افزار table curve این نتیجه حاصل گردید که تابع سیگموئید^{۱۴} که در تخمین بروش شبکه‌های عصبی مصنوعی نیز کاربرد بسیاری دارد جدول ۲- ضرایب مدل واریوگرام گوسی برازش داده شده به

واریوگرام‌های تجربی

ضریب محدوده اثر (a)	(C)	
۲۰۲	۳۵۵۶۸	واریوگرام تجربی بار معلق
۳۰۵	۴۳۲۵۰	واریوگرام تجربی دبی جریان مقیاس شده
۱۹۱	۲۸۵۹۷	واریوگرام متقابل تجربی دبی جریان - بار معلق



شکل ۶- برازش مدل گوسی به واریوگرام تجربی بار معلق



بهترین برازش را بر واریوگرام‌های تجربی خواهد داشت، ولی از آنجایی که در Gslib محدودیت تعریف مدل واریوگرام وجود داشته و فقط چهار مدل استاندارد قابل تعریف می‌باشند، امکان استفاده از این تابع به عنوان مدل واریوگرام وجود نداشت، ولی به هر حال هر چند استفاده از تابع سیگموئید به عنوان مدل واریوگرام می‌توانست نتایج این مطالعه را دقیقتر کند، ولی با توجه به نزدیکی ساختار ریاضی تابع مذکور با تابع گوسی می‌توان پیش‌بینی کرد که نتایج حاصل از این دو مدل اختلاف کمی باهم داشته باشند.

جدول ۳ الف- مقادیر بار معلق تخمینی برای مقاطع مختلف تلخه رود فاصله از مبدا >= ۱۰۰

۱۰۰	۹۰	۸۰	۷۰	۶۰	۵۰	۴۰	۳۰	۲۰	۱۰	۰	فاصله مقطع از مبدا (Km)
۱۰۸/۹۱۸	۹۳/۰۲۶	۷۷/۳۶۷	۶۲/۲۶۷	۴۸/۱۸۳	۳۵/۳۸	۲۴/۲۰۳	۱۴/۹۳۷	۷/۸۵	۳/۰۸۷	۰/۸۲۴	یکدهم بار معلق تخمینی بروش کریجینگ (mg/lit)
۱۰۸/۹۰۳	۹۲/۸۸	۷۷/۰۶	۶۱/۸۷	۴۷/۷۰۸	۳۴/۹۳۹	۲۳/۸۷۸	۱۴/۷۸۵	۷/۸۵	۳/۱۸۸	۰/۸۲۴	یکدهم بار معلق تخمینی بروش

											کوکریجینگ (mg/lit)
--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	-----------------------

جدول ۳- فاصله از مبدا < ۱۰۰

۱۸۰	۱۷۰	۱۶۰	۱۵۰	۱۴۰	۱۳۰	۱۲۰	۱۱۰	فاصله مقطع از مبدا (Km)
۱۹۴/۷۵	۱۹۱/۴۹	۱۸۵/۴۷	۱۷۶/۹	۱۶۶/۱۶۴	۱۵۳/۶۱۶	۱۳۹/۶۰۲	۱۲۴/۵۵۲	یکدهم بارمعلق تخمینی بروش کریجینگ (mg/lit)
۱۹۴/۶۸۵	۱۹۱/۱۷	۱۸۵/۱۶۷	۱۷۶/۷۸	۱۶۶/۲۱۸	۱۵۳/۷۶۷	۱۳۹/۷۸۷	۱۲۴/۶۸۷	یکدهم بارمعلق تخمینی بروش کوکریجینگ (mg/lit)

است در بعضی ایستگاهها میزان خطای بیشتری نسبت به روش کریجینگ ارائه کند ولی در حالت کلی و در مجموع خطاهای تخمینی برای این روش کمتر از روش کریجینگ می باشد که این امر در اکثر بررسی های صورت گرفته در زمینه مقایسه این دو روش تصدیق شده است
(Tomn, 1998) می توان علت بالا بودن خطاهای روش کوکریجینگ در بعضی از ایستگاههای ابتدایی را با دقت در شکل (۲) در عدم تطبیق مناسب بین دو پارامتر اصلی و فرعی در ایستگاههای ابتدایی جستجو کرد.

برای تعیین صحت مدل انتخابی و همین طور مقایسه دو روش تخمینی کریجینگ و کوکریجینگ، داده های مربوط به هر کدام از ایستگاهها را تک به تک و به ترتیب حذف و سپس با استفاده از مدل تعیین شده اقدام به تخمین بار معلق برای ایستگاه کنار گذاشته شده گردید (Cross Validation)، که این عمل تخمین، هم با روش کریجینگ و هم با روش کوکریجینگ صورت گرفت. نتایج محاسبات در جدول (۴) آورده شده است. چنانچه از میزان درصد خطاها مشخص است، مدل تعیین شده نتایج مطلوبی ارائه داده و قابل اطمینان می باشد، از طرفی روش کوکریجینگ هر چند که ممکن

جدول ۴- مقدار بار معلق تخمینی برای هر ایستگاه کنار گذاشته شده

نام ایستگاه	یکدهم مقدار بار معلق اندازه گیری شده (mg/lit)	یکدهم مقدار بار معلق تخمینی بروش کریجینگ (mg/lit)	قدرمطلق خطای تخمینی بروش کریجینگ	یکدهم مقدار بار معلق تخمینی بروش کوکریجینگ (mg/lit)	قدرمطلق خطای تخمینی بروش کوکریجینگ
میرکوه(اسقران)	۰/۸۲۴	۱/۱۵	۰/۳۲۶	۰/۳۴۷	۰/۴۷۷
سرانسر(ارزنق)	۷/۸۵	۷/۱۶	۰/۶۹	۷/۷۶	۰/۱
مرکید	۱۱۰/۵	۱۱۱/۷۶	۱/۲۶	۱۱۰/۸۴	۰/۳۴
ونبار	۱۶۹/۶	۱۶۷/۸	۱/۸	۱۶۹/۴۷	۰/۱۳
آخوله	۱۹۴/۵	۲۰۰/۸۲	۶/۳۲	۱۹۷/۷۶	۳/۲۶

۵- نتایج و پیشنهادات

الف) هرچند از بین چهار مدل واریوگرام استاندارد موجود در نرم افزار Gslib مدل گوسی بهترین برازش را بر واریوگرام های تجربی بدست آمده از آمار ایستگاههای تلخه رود دارد ولی طبق بررسی انجام یافته در صورت استفاده از تابع سیگموئید به جای تابع گوسی می توان انتظار رسیدن به جوابهای دقیقتر را داشت.

ب) در برآورد مکانی بار معلق می توان با استفاده از روش تخمین چند پارامتری کوکریجینگ و استفاده از دبی جریان به عنوان متغیر مکانی فرعی نتایج بهتری نسبت به تخمین تک پارامتری کریجینگ که فقط با استفاده از متغیر اصلی صورت می گیرد گرفت، هرچند که ممکن است در مناطقی که با توجه به دیاگرام متقابل دو پارامتر اصلی و فرعی تطابق مناسبی بین دو پارامتر وجود نداشته باشد، خطای روش کوکریجینگ نسبت به کریجینگ بیشتر محتمل باشد.

ج) در مناطقی که ایستگاه رسوب سنجی وجود ندارد میزان واریانس تخمین بالا بوده و دقت تخمین پایین می آید. با آنالیز روی میزان واریانس تخمین می توان برای تعیین موقعیت ایستگاههای جدیدالاحداث اظهار نظر کرد. از طرفی با توجه به مقادیر واریانس تخمینی حساب شده بوسیله Gslib ملاحظه گردید که واریانس تخمین برای روش کوکریجینگ کمتر از روش کریجینگ می باشد.

د) برای بدست آوردن نتایج بهتر پیشنهاد می شود که با جمع آوری اطلاعات چندین ساله ایستگاهها، برای محدوده های زمانی مختلف و تحت دبی جریانهای مختلف مدل های گوناگونی را استخراج و با مطالعه آماری روی آنها بهترین و کلی ترین مدل برآورد مکانی بار معلق رسوبی برای تلخه رود را تعیین نمود، برای این منظور حتی می توان از مدل های چند ضابطه ای استفاده کرد، بدین صورت که تحت یک محدوده خاصی از دبی جریان یک مدل مشخص و در

محدوده دیگر دبی از یک مدل دیگر که نتایج بهتری ارائه می کند استفاده شود. بررسی های صورت گرفته بیانگر آن است که در صورت استفاده از آنالیز سریهای زمانی در کنار آنالیز سریهای مکانی مطرح در ژئواستاتستیک می توان به نتایج مطلوبتری دست یافت

(Rouhani and Wackernagel, 1990) و از آنجایی که همواره آنالیز زمانی روی بار معلق رسوب برای یک ایستگاه با ترسیم منحنی دبی- بار معلق صورت می گیرد می توان با ادغام این آنالیز در آنالیز مکانی توضیح داده شده در این مقاله به یک مدل جامع برای برآورد مکانی بار معلق تلخه رود دست یافت.

ه) از آنجایی که علاوه بر دبی جریان سایر پارامترها از جمله قطر رسوبات، سرعت جریان، عمق متوسط جریان، عرض مقطع، شیب کف، شعاع انحناء رود و ... نیز می توانند در میزان بار معلق دخالت کنند (هرچند به میزان کم) پیشنهاد می شود که از یک یا چند مورد از این پارامترها در کنار پارامتر دبی جریان به عنوان پارامترهای فرعی در تخمین چند پارامتری کوکریجینگ برای برآورد بار معلق استفاده شود، برای این منظور لازم است از روابط کلی و ماتریسی کوکریجینگ استفاده شود (Myers, 1982). هر چند در این حالت ممکن است نتایج مطلوبتری حاصل شود ولی با توجه به پیچیدگی و مشکلات مربوط به حل معادلات کوکریجینگ شاید استفاده از چند پارامتر فرعی مقرون به صرفه نباشد (Ahmed and Marsily, 1987).

۶- تشکر

بدین وسیله لازم است کمال تشکر و امتنان خودمان را از همکاریهای فنی آقای مهندس محمدی اهری مدیر دفتر مطالعات آبهای سطحی و آقای مهندس فایقی ارجمند کارشناس دفتر مهندسی رودخانه سازمان آب منطقه ای آذربایجان شرقی و اردبیل داشته باشیم.

رستمی، محمد و اردشیر، عبدا...، "ارائه روشی به منظور برآورد بار رسوب معلق رودخانه‌ها"، سومین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشکده فنی دانشگاه تهران، ایران، ۱۳۸۰.

Ahmed, S. and Marsily, G., (1987), "Comparison of Geostatistical Methods for Estimating Transmissivity Using Data on Transmissivity and Specific Capacity", *Water Resour. Res.*, Vol. 23(9), pp. 1717-1737.

Cressie, N. (1985), "Fitting Variogram Models by Weighted Least Square", *Mathematical Geology*, Vol. 17(5), pp. 563-586.

Deutsch, C. V. and Journel A. G. (1992), "*Gslib: Geostatistical Software Library and User's Guide*", Oxford University Press, 339 p.

Isaaks, E. H. and Srivastava, R. M. (1989), "Applied Geostatistics", Oxford University Press, 561 p.

Myers, D. E., (1982) "Matrix Formulation of Cokriging", *Mathematical Geology*, Vol. 14, pp. 249-257.

Pan, G. C., Gaard, D., Moss, K. and Heiner, T. (1993), "A Comparison between Cokriging and Ordinary Kriging: A Case Study with a Polymetallic Deposit", *Mathematical Geology*, Vol. 25 (3), pp. 377-398.

Rouhani, S. and Wackernagel, H. (1990), "Multivariate Geostatistical Approach to Space-Time Data Analysis", *Water Resour. Res.*, Vol. 26(4), pp. 585-591.

Tonn, R. (1998), "Seismic Reservoir Characterization of Montney Sand in the Peace River Arch Area Canada", *Gove. Reports*, The Leading Edge, Calgary, Alberta, Canada.

- 1-Geostatistics
- 2-Cokriging
- 3-Matheron
- 4-Covariance
- 5-Sill
- 6-Variogram
- 7-Semi Variogram
- 8-Intrinsic
- 9-Cross Covariance
- 10-Ordinary Kriging & Cokriging
- 11-Isotopic
- 12-Scatter Plot
- 13-Nugget Effect
- 14-Sigmoid

۷- مراجع

آوریده، فریبا و بنی حبیب، محمدابراهیم و طاهر شمسی، احمد، "کاربرد شبکه‌های عصبی مصنوعی جهت تخمین دبی رسوب رودخانه‌ها"، سومین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشکده فنی دانشگاه تهران، ایران، ۱۳۸۰.

استاد علی عسکری، منصور و شفاعی بجنستان، محمود، "برآورد بار بستر و بار رسوب کل رودخانه‌های کارون و کرخه با روش اصلاح شده انیشتین"، پنجمین کنفرانس مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید چمران اهواز، ایران، ۱۳۷۷.

حسنی پاک، علی اصغر، "زمین آمار"، انتشارات دانشگاه تهران، ایران، ۱۳۷۷، ۳۱۴ صفحه.

تاریخ دریافت مقاله: ۲۵ اسفند ۱۳۸۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۸ فروردین ۱۳۸۴