بررسی رابطه بین پارامترهای هندسی مئاندرهای رودخانه و ضریب سینوسیته

احمد طاهرشمسی[i]؛ فرهاد ایمان شعار[ii]

چکیده

رودخانه های جاری در بسترهای آبرفتی همیشه دستخوش پدیده مئاندری شدن هستند. در این مقاله ارتباط بین مشخصات هندسی مئاندر و پارامتر سینوسیته که خود تابعی از شیب دره و شیب کانال است، به لحاظ نظری مشخص گردید. سپس بر اساس داده های میدانی مربوط به رودخانه سیستان که یک رودخانه مئاندری مي‌باشد و بر اساس مدل رياضي بدست آمده، مشخصات هندسی مئاندرهای این رودخانه محاسبه و تعیین شد.

در پایان مقادیر محاسبه شده با مقادیرمشاهده شده در بازه های مختلف رودخانه سیستان، مقایسه شدند. این مطالعه نشان می‌دهد که نتایج مدل یاد شده، همخوانی مناسبی با داده های صحرایی این رودخانه دارند.

کلمات کلیدی

مئاندر رودخانه، ضریب سینوسیته، رودخانه سیستان

Study of Relationship between River Meanders' Geometric Parameters and Sinuosity Factor

A. Taher-shamsi; F. Imanshoar

ABSTRACT

Running rivers in alluvial plains, always drawn to meandering process. In this paper, according to valley slope and river slope, the relationship between meanders' geometric parameters and sinuosity factor revealed. Based on the field data of Sistan River which is a meandering one, meanders geometric characteristics of this river were calculated and defined on the base of mathematical model.

Finally, estimated results were compared with observed measurements in different reaches of Sistan River. This research demonstrates that acquired estimations and field measurements have a good correlation coefficient.

KEYWORDS

River Meander, Sinuosity Factor, Sistan River

[i] دانشیار دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر:Email: tshamsi@aut.ac.ir
[ii] دانشجوی دکتری مهندسی عمران - آب، دانشگاه تبریز:Email: imanshoar@wrm.ir

۱- مقدمه

بررسی پلان و پروفیل رودخانه‌ها روش مناسبی برای درک پدیده‌های مورفولوژیک در رودخانه است. به همین دلیل طبقه بندی رودخانه ها مبتنی بر شکل آنها در پلان، به عنوان یکی از رایج ترین روشهای طبقه بندی رودخانه ها بوده است. از لحاظ نظری می‌توان اینطور استدلال نمود که در حالت طبیعی یک رودخانه در برابر تأثیر عوامل خارجی بدون حفاظ است و در نتیجه شکل پلان آن تغییر می‌کند و بسته به نحوه اثر عوامل خارجی می‌تواند اشکال گوناگونی به خود بگیرد. به همین دلیل طبقه بندی رودخانه‌ها بر اساس شکل ظاهری آنها مورد اقبال پژوهشگران در این رشته قرار گرفته است. [۹]

از میان محققان مختلف، لین (Lane,۱۹۵۷) ، لئوپولد و ولمن (Leopold and Wolman, ۱۹۷۰)، میلر (Miller,۱۹۶۴) و چیتاله (Chitale,۱۹۷۰) در این زمینه تحقیقات متفاوتی انجام داده‌اند و روشهای یکسانی را برای طبقه بندی رودخانه ها ارائه نموده اند. [۲]، [۵]

در بین این طبقه بندي‌ها، معروفترین آنها طبقه بندی لئوپولد و ولمن است. در این روش رودخانه ها در سه دسته طبقه بندی شده‌اند: رودخانه‌های مستقیم، رودخانه های مئاندری و رودخانه‌های شریانی.

در طبقه بندی یاد شده منظور از رودخانه مستقیم، رودخانه ای است که مسیر آن نزدیک به مستقیم الخط باشد و انحنای شدید نداشته باشد، البته این الگوی هندسی نادر است و فقط در بازه های کوتاهی از رودخانه بوجود می آید.

نقطه مقابل این الگو، رودخانه های مئاندری (پیچان رودها) هستند که مسیر آنها دارای خمهای متوالی با انحنای زیاد است و این خمها توسط یک بازه کوتاه و مستقیم به یکدیگر متصل می شوند و در یک نگاه کلی، پلان رودخانه به شکل s های متوالی دیده می شود. به عبارت دیگر، رودخانه مئاندری دارای تعداد زیادی مئاندر است که هر مئاندر دارای دو خم متوالی با انحنای وارون است.

دسته سوم رودخانه ها به لحاظ شکل ظاهری، رودخانه های شریانی (انفکاکی) هستند. در این رودخانه ها مسیر جریان در هر مقطع از چندین مجرا تشکیل شده است. این مجاری گاه به یکدیگر ملحق می شوند و گاه دوباره از یکدیگر جدا می شوند. به عبارت دیگر مجرای این نوع از رودخانه ها متشکل از شبکه بهم پیوسته ای از مسیر های کوتاه و کم عرض است. در رودخانه های شریانی تعداد نهشته های رسوبی نشانگر درجه شریانی بودن رودخانه (تعداد مجاری آبراهه) است.

۲- ویژگي های رودخانه های مئاندری

در مهندسی رودخانه به هر یک از پیچ های مسیر رودخانه که دست کم از دو خم با انحنای معکوس تشکیل شده باشد، مئاندر گفته می‌شود. ویژگی های رودخانه‌های مئاندری عبارتند از: [۳]، [۸]

الف - در قسمتی از سواحل آنها فرسایش رخ می‌دهد و پیرو آن در قسمتی رسوب گذاری رخ می‌دهد؛ بنابراین سواحل آنها نیاز به عملیات تثبیت و حفاظت دارند.

ب - شیب طولی و سرعت جریان در آنها کم است.

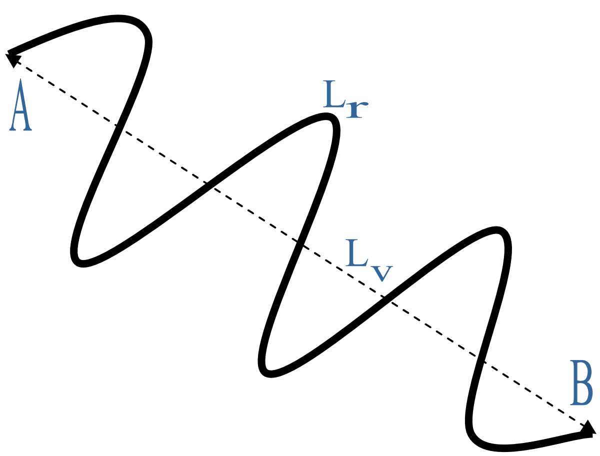
ج - مصالح تشکیل دهنده سواحل و بستر آنها بیشتر ریز دانه (ماسه، لای و رس) است.

د - وقوع سیلاب در این نوع رودخانه ها منجر به ایجاد خسارت در تأسیسات مجاور آن مي‌شود.

۳- ضریب سینوسیته (خمیدگی)

ضریب سینوسیته یا ضریب خمیدگی اولین بار توسط لئوپولد، ولمن و میلر (Leopold, Wolman and Miller,۱۹۶۴) برای طبقه بندی رودخانه ها تعریف شده است. [۶]

بنا به تعریف، ضریب سینوسیته برابر است با طول تالوگ رودخانه (محل عمیق ترین جای جریان) به طول دره‌ای که رودخانه در آن جریان دارد. مطابق شکل (۱)، L_r طول تالوگ مجرای رودخانه و L_v فاصله مستقیم بین نقاط A وB (ابتدا وانتهای بازه رودخانه) یا همان طول دره است.



شکل (۱): شکل تیپ رودخانه های مئاندری

به همین دلیل، بنا به تعریف، P یا همان ضریب سینوسیته برابر خواهد بود با:

$$P = \frac{L_r}{L_v} \qquad (۱)$$

از طرفی اگر در شکل (۱)، اختلاف تراز نقاط A وB برابر Δh باشد، S_r شیب طولی رودخانه برابر خواهد بود با:

$$S_r = \frac{\Delta h}{L_r} \qquad (۲)$$

به همین ترتیب S_v شیب دره برابر است با:

$$S_v = \frac{\Delta h}{L_v} \qquad (۳)$$

پس:

$$\frac{S_v}{S_r} = \frac{\frac{\Delta h}{L_v}}{\frac{\Delta h}{L_r}} = \frac{L_r}{L_v} \qquad (۴)$$

از مقایسه روابط (۱) و (۴) ملاحظه می‌شود که ضریب سینوسیسته را مانند رابطه (۵) می‌توان تعریف کرد:

$$P = \frac{S_v}{S_r} \qquad (۵)$$

رابطه قبل نشانگر این مطلب است که ضریب سینوسیته تابعی از شیب دره و شیب واقعي رودخانه است. شیب دره در زمانهای بسیار طولانی و در اثر فرایندهای زمین شناسی شکل می‌گیرد؛ بنابراین در کارهای مهندسی شیب دره ثابت در نظر گرفته می‌شود. لیکن شیب رودخانه پدیده ای مورفولوژیک است که در اثر فرایندهای آبرفتی و عوامل مؤثر در رفتار رودخانه ها در کوتاه مدت تغییر می‌کند. به همین دلیل ضریب سینوسیته نیز پدیده‌ای مورفولوژیک و متغیر خواهد بود که تمام فرایندهای مورفولوژیکی در آن نهفته است و عواملی از قبیل دبی جریان، میزان بارهای رسوبی، مقاومت بستر و سواحل در مقابل جریان، پوشش گیاهی کناره ها و فعالیتهای بشری بر آن مؤثرند. با این وجود در پروژه‌های مهندسی رودخانه می‌توان به کمک عملیات نقشه برداری و اندازه گیری شیب طولی رودخانه و شیب دره، بر اساس معادله (۵) ضریب سینوسیته را برای بازه های مورد مطالعه در یک رودخانه محاسبه کرد.

رودخانه ها را با توجه به مقدار ضریب سینوسیته به سه دسته می‌توان طبقه بندی کرد: [۶]

۱- رودخانه‌های باضریب سینوسیته کم $(۱ < P < ۱/۵)$

۲- رودخانه‌های با ضریب سینوسیته متوسط $(۱/۵ \leq P < ۲)$

۳- رودخانه های با ضریب سینوسیته بزرگ $(P \geq ۲)$

در صورتیکه ضریب سینوسیته رودخانه در حد متوسط یا بزرگ باشد، رودخانه مئاندری محسوب می‌شود. به طور کلی در رودخانه های مئاندری، طول رودخانه L_r همیشه بزرگتر از طول دره L_v است $(L_r > L_v)$ و در نتیجه ضریب سینوسیته بزرگتر از واحد خواهد بود $(P > ۱)$. بنابراین مطابق رابطه (۵) می‌توان گفت که در رودخانه های مئاندری، شیب دره بزرگتر از شیب رودخانه خواهد بود $(S_v > S_r)$.

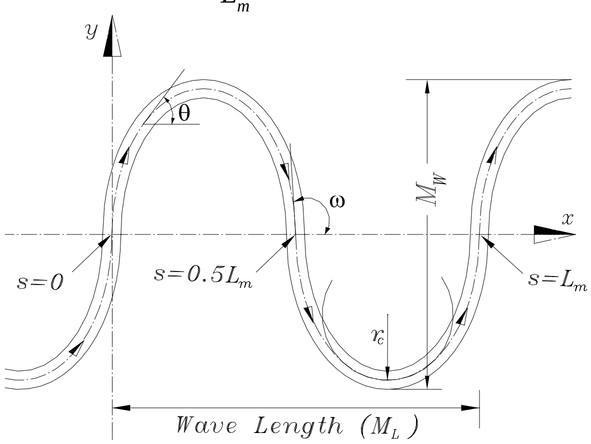
۴- مدل ریاضی مئاندر در پلان

در مدل دو بعدی رودخانه، شکل هندسی مسیر رودخانه در پلان به کمک خط تالوگ آن شبیه سازی می‌شود. بر این اساس و به دلیل وجود تشابه زیاد بین شکل هندسی مئاندرهای منظم رودخانه با شکل هندسی موج سینوسي در پلان، لانگبین و لئوپولد (Langbein and Leopold,۱۹۶۶) رابطه سینوسی (۶) را برای خط تالوگ رودخانه و به منظور مدلسازی ریاضی مئاندرهای رودخانه در پلان پیشنهاد نموده اند: [۳]، [۵]

$$y = y_0 Sinkx,\ k = \frac{۲\pi}{M_L} \qquad (۶)$$

این رابطه در مختصات قطبی به صورت رابطه (۷) خواهد بود:

$$\theta = \omega\ Sinks\ ,\ k = \frac{۲\pi}{L_m} \qquad (۷)$$



شکل (۲): مشخصات هندسی مئاندر در مدل ریاضی

در روابط قبل و مطابق شکل (۲)، x محور مختصات طولی در امتداد رودخانه، y انحراف امتداد رودخانه نسبت به محور x ها، y_0 حداکثر مقدار y و برابر نصف M_W دامنه موج، k عدد موج، M_L طول موج، θ زاویه بین خط مماس بر هر نقطه از محور رودخانه و امتداد محور x ها، ω حداکثر مقدار θ، s فاصله هر نقطه روی محور رودخانه نسبت به مبدا و L_m طول کمان مئاندر است.

۵- توسعه ضریب سینوسیته در مدل سینوسی

مطابق شکل (۲)، P ضریب سینوسیته مئاندر برابر است با طول کمان مئاندر (L_m) بخش بر طول موج آن (M_L):

$$P=\frac{L_m}{M_L} \qquad (۸)$$

برای توسعه ضریب سینوسیته در مدل سینوسی، نحوه تغییرات این ضریب در امتداد رودخانه و نسبت به حدود تغییرات زاویه θ مورد بررسی قرار می‌گیرد. با توجه به این مطلب برای المانی به طول dx با توجه به اینکه $dx=ds.Cos\theta$ است، چنین می‌توان نوشت:

$$d(\frac{x}{M_L})=\frac{ds}{M_L}.Cos\theta \qquad (۹)$$

از طرف دیگر به کمک معادله (۷)، مقدار فاصله هر نقطه روی محور رودخانه نسبت به مبدأ به شرح رابطه (۱۰) قابل محاسبه است:

$$s=\frac{1}{2\pi}.L_m.ArcSin\frac{\theta}{\omega} \qquad (۱۰)$$

بر اساس معادله (۱۰)، معاله (۹) به شرح معادله (۱۱) گسترش می‌یابد:

$$d(\frac{x}{M_L})=\frac{-1}{2\pi}.\frac{L_m}{M_L}.\frac{Cos\theta}{(\omega^2-\theta^2)}d\theta \qquad (۱۱)$$

با توجه به معادله (۱۱)، از آنجا که زاویه انحراف بین مئاندر رودخانه و امتداد محور افق در بازه ای به صورت $\omega \sim 0$ تغییر می‌کند، پس برای مدلسازی این بازه طولی برابر با $x=\frac{1}{4}M_L$ انتخاب می‌شود. در نتیجه اگر از معادله (۱۱) در محدوده یاد شده انتگرال گیری شود به طوری که به ازاء $\frac{x}{M_L}=0$، $\theta=\omega$ و به ازاء $\frac{x}{M_L}=\frac{1}{4}$، $\theta=0$ باشد، آنگاه می‌توان نوشت: [۸]، [۱۰]

$$\int_0^{\frac{1}{4}} d(\frac{x}{M_L}) = \frac{-1}{2\pi}.\frac{L_m}{M_L}.\int_\omega^0 \frac{Cos\ \theta}{(\omega^2-\theta^2)^{0.5}}d\theta$$
$$= \frac{1}{2\pi}.\frac{L_m}{M_L}.\int_0^\omega \frac{Cos\ \theta}{(\omega^2-\theta^2)^{0.5}}d\theta$$
$$= \frac{P}{2\pi}.\int_0^\omega \frac{Cos\ \theta}{(\omega^2-\theta^2)^{0.5}}d\theta = \frac{1}{4}$$

در نتیجه:

$$\frac{1}{P}=\frac{2}{\pi}\int_0^\omega \frac{Cos\ \theta}{(\omega^2-\theta^2)^{0.5}}d\theta \qquad (۱۲)$$

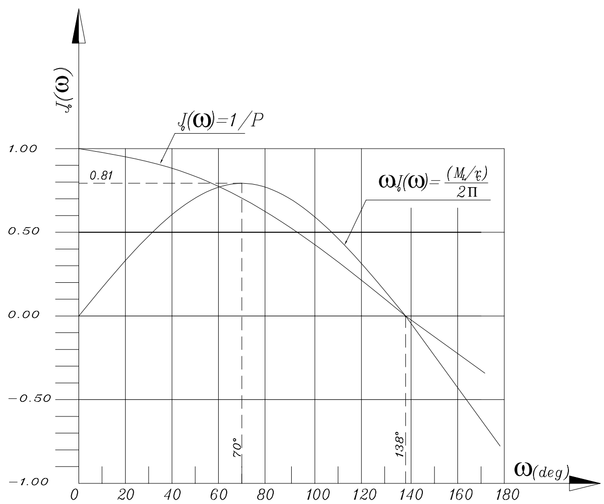
با تغییر متغیر $\xi=\frac{\theta}{\omega}$ رابطه (۱۲) به صورت (۱۳) خواهد شد:

$$\frac{1}{P}=\frac{2}{\pi}\int_0^1 \frac{Cos\ (\omega\xi)}{(1-\xi^2)^{0.5}}d\xi \qquad (۱۳)$$

رابطه (۱۳) یک تابع بسل نوع اول از درجه صفر است. یعنی:

$$\frac{1}{P}=J_0(\omega) \qquad (۱۴)$$

حل ترسیمی این تابع در شکل (۳) ارائه شده است. به کمک این نمودار می‌توان به ازاء هر مقدار ω، ابتدا مقدار $J_0(\omega)$ و در پایان مقدار P ضریب سینوسیته را محاسبه کرد و یا اینکه با در دست داشتن مقدار ضریب سینوسیته، مقدار زاویه ω را برای مئاندرهای رودخانه تعیین کرد. [۱۰]



شکل (۳): تابع بسل نوع اول از درجه صفر [۱۰]

۶- تعیین پارامترهای هندسی مئاندر

با توجه به رابطه به دست آمده بین ضریب سینوسیته و حداکثر مقدار زاویه بین خط مماس بر هر نقطه از محور رودخانه و امتداد افق (ω)، پارامترهای هندسی مئاندر رودخانه بر این اساس به شرح ۶-۱ قابل محاسبه خواهند بود:

۶-۱- محاسبه شعاع انحناء مئاندر در رأس خم

چون انحنای مئاندر در هر نقطه، مشتق زاویه انحراف مئاندر از محور مستقیم نسبت به مختصات منحنی الخط x است، در نتیجه با استفاده از مدل سینوسی و رابطه حاصل از آن برای خط تالوگ رودخانه در مختصات قطبی (معادله ۷)، شعاع انحناء مئاندر به شرح رابطه (۱۵) قابل محاسبه خواهد بود:

$$r = \frac{d_S}{d_\theta} = \frac{۱}{\frac{d_\theta}{d_s}} = \frac{۱}{\frac{۲\pi\omega}{L_m}.Cos\,(\frac{۲\pi s}{L_m})} \qquad (۱۵)$$

از طرفی مقدار شعاع انحناء در رأس خـم بـه کمتـرین مقـدار خود خواهد رسید. یعنی به ازای $\frac{s}{L_m} = ۰$ شـعاع انحنـاء در رأس خم به شرح رابطه (۱۶) قابل محاسبه خواهد بود:

$$r_c = \frac{۱}{\frac{۲\pi\omega}{L_m}} = \frac{L_m}{۲\pi\omega} \qquad (۱۶)$$

با جایگذاری معادله (۸) و (۱۴) در معادله (۱۶)، مقـدار شـعاع انحناء مئاندر در رأس خـم بـه سـادگی از معادلـه (۱۷) قابـل محاسبه خواهد بود:

$$r_c = \frac{P.M_L}{۲\pi\omega} = \frac{M_L}{۲\pi\omega\,.\,J_۰(\omega)} \qquad (۱۷)$$

در رابطه (۱۷)، r_c نشانگر شعاع انحنـاء مئانـدر در رأس خـم است و سایر پارامترها پیشتر تعریف شده اند.

۶-۲- محاسبه نسبت دامنه مئاندر به طول موج آن

جانسون (Janson,۱۹۸۳) رابطه (۱۸) را برای محاسبه نسبت عرض مئاندر به طول موج آن ارائه کرده است: [۴]

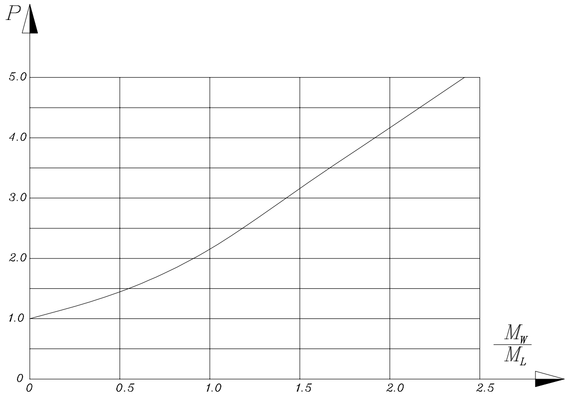
$$P = \frac{۲}{\pi}\, f(\frac{M_W}{M_L}) \qquad (۱۸)$$

که در آن:

$$f(\frac{M_W}{M_L}) = \sqrt{۱ + (\pi\,\frac{M_W}{M_l})^۲}\;.\int_۰^{\frac{\pi}{۲}} \left[\sqrt{۱ - \frac{(\pi\,\frac{M_W}{M_L})^۲}{۱ + (\frac{\pi M_W}{M_L})^۲}.Sin^۲\theta} \right] d\theta$$

در رابطه (۱۸)، M_W دامنه مئاندر و M_L طول مـوج مئانـدر است. حل معادله (۱۸) به نـام تـابع لژانـدر، در کتـب ریاضـی موجود است. منحنـی تغییـرات P نـسبت بـه $\frac{M_W}{M_L}$ مطـابق شکل (۴) است. با توجه به معادله (۱۸) و با جایگذاری معادله (۱۴) در آن، نسبت دامنه مئاندر به طول موج مئاندر به شـرح رابطه (۱۹) قابل محاسبه خواهد بود:

$$f(\frac{M_W}{M_L}) = \frac{\pi}{۲J_۰(\omega)} \qquad (۱۹)$$



شکل (۴): نمودار تغییرات نسبت دامنه مئاندر به طول موج آن در برابر ضریب سینوسیته [۱۰]

۶-۳- محاسبه عمق جریان در محل رأس خم

روزوسکی (Rozovski,۱۹۶۳) با مطالعه مورفولوژی رودخانه‌های مئاندری عریض ($\frac{M_W}{d} \geq ۵$) که دارای جریان‌های آشفته بودند، رابطه (۲۰) را برای محاسبه عمق جریان متناظر با دبی مقطع پر در محل رأس خم ارائه کرده است: [۷]

$$d = \frac{\omega.\kappa.\sqrt{g}.r_c}{۱/۱۵\,C} \qquad (۲۰)$$

در معادله قبل، ω حداکثر مقدار زاویه بین خط مماس بر هر نقطه از محور رودخانه و امتداد افق (نصف کمـان مئانـدر)، C ضـریب شـزی، κ ضـریب فـون کـارمن ($\kappa \approx ۰/۴$)، g شـتاب ثقـل، r_c شعاع انحناء مئاندر در رأس خم و d عمق جریان متناظر با دبـی مقطع پر رودخانه است.

۶-۴- ساده سازی رابطه بین پارامتر های هندسی مئاندر و ضریب سینوسیته

برای جمع بندی، اگر معادلات (۸)، (۱۴)، (۱۶)، (۱۷)، (۱۹) و (۲۰) مد نظر باشند، روابط بین پارامترهای هندسی مئاندر و سینوسیته به شرح معادله (۲۱) ساده می‌شوند:

$$P = \frac{L_m}{M_L} = \frac{۱}{J_۰(\omega)} = \frac{۲\pi\omega\, r_c}{M_L} = \frac{۲}{\pi}\, f(\frac{M_W}{M_L}) = \frac{۲/۳\,\pi dC}{M_L.\kappa\sqrt{g}} \qquad (۲۱)$$

تمام پارامترهای دخیل در معادله (۲۱) پیشتر معرفی شده‌اند.

۷- مطالعه موردی: رودخانه سیستان

سیستان نام شعبه ای از رودخانه هیرمند است که از آن جدا شده و وارد خاک ایران می‌شود. بر اساس تقسیم بندي هاي رايج در علم مهندسی رودخانه، رودخانه سیستان دارای الگوئی

مئاندری است و از رودخانه های پیر و جاری در دشت است. الگوی هر کدام از مئاندرهای رودخانه سیستان یک نظم هندسی مشهود را نشان می‌دهد. بر اساس اندازه گیری های انجام شده در سال ۱۳۷۰، رودخانه سیستان را بر اساس شیب می‌توان به چهار بازه جداگانه تقسیم کرد. رخداد این شیب ها را می‌توان ناشی از احداث سد کهک در ابتدای بازه ۱ و تغییر محلی در رخنمون‌های زمین شناسی و وجود هامون در انتهای رودخانه فرض نمود. مشخصات بازه‌های رودخانه سیستان در جداول (۱) و (۲) ذکر شده است. [۱]

جدول (۱): مشخصات بازه های رودخانه سیستان [۱]

شماره بازه	ابتدا	انتها	طول آبراهه بر حسب متر
۱	سد کهک	بند زهک	۱۸۰۰
۲	بند زهک	پل نهوراب	۱۶۴۰۰
۳	پل نهوراب	پل سیستان	۲۱۸۰۰
۴	پل سیستان	هامون	۲۷۷۰۰

در این تحقیق، مئاندرهای رودخانه سیستان از نوع مئاندرهای آزاد فرض شده اند یعنی اینکه مئاندرها به صورت آزاد فقط در اثر بر هم کنش جریان و مصالح موجود در بستر و سواحل رودخانه و به دور از هر گونه عامل محدود کننده‌ای شکل گرفته اند. از طرفی در این مطالعه مئاندرهای رودخانه متقارن و منظم فرض شده اند. به همین دلیل، عمود منصف پاره خط محدود به نقاط عطف متوالی در روی مئاندر، حلقه آن را به دو بخش مساوی تقسیم کرده و هر قسمت مئاندر نسبت به این عمود منصف متقارن است.

روند انجام محاسبات در این تحقیق به گونه ای است که ابتدا برای هر یک از بازه‌های رودخانه سیستان، مقدار ضریب سینوسیته با توجه به مقادیر اندازه گیری شده شیب طولی رودخانه و شیب دره (عملیات نقشه برداری) محاسبه می‌شود. سپس به کمک معادله (۱۴) و شکل (۳) حداکثر مقدار زاویه بین خط مماس بر هر نقطه از محور رودخانه و امتداد افق (ω) محاسبه می شود. در گامهای بعدی، در هر یک از بازه ها با توجه به معادله (۲۱) سایر پارامترهای هندسی مئاندرهای رودخانه سیستان متناظر با عبور دبی مقطع پر تخمین زده می‌شوند.

روند انجام محاسبات و نتایج حاصل به منظور تخمین پارامترهای هندسی مئاندرهای رودخانه سیستان در جداول (۲) و (۳) خلاصه شده اند:

الف) در جدول (۲) مقادیر شیب دره، شیب طولی رودخانه و ضریب سینوسیته برای هر یک از بازه های رودخانه سیستان گفته شده است.

جدول (۲): مقادیر شیب دره، شیب رودخانه وضریب سینوسیته هر یک از بازه های رودخانه سیستان [۱]

شماره بازه	S_r	S_v	P
۱	۰/۰۰۰۳۴	۰/۰۰۰۳۴	۱/۰۰
۲	۰/۰۰۰۲۸	۰/۰۰۰۴۴	۱/۵۷
۳	۰/۰۰۰۲۱	۰/۰۰۰۲۶	۱/۲۴
۴	۰/۰۰۰۰۹۴	۰/۰۰۰۱۱	۱/۱۷

ب) بر اساس مقادیر نوشته شده در جدول (۲)، برای هر یک از بازه های رودخانه، پارامترهای هندسی مئاندرهای بالغ رودخانه سیستان (مئاندرهائی که مورفولوژی آنها در پلان و مقطع متناظر با عبور دبی مقطع پر، توسعه یافته است) بر اساس گامهای گفته شده قبلی حساب شده اند که نتایج آن در جدول (۳) به تفکیک هر یک از بازه های این رودخانه ارائه شده اند.

جدول (۳): تخمین پارامترهای هندسی مئاندرهای رودخانه سیستان

پارامتر	واحد	بازه ۱	بازه ۲	بازه ۳	بازه ۴
L_m	m	-	۱۸۴۷	۳۲۳۸	۵۵۹۵
M_L	m	-	۱۲۹۷	۲۴۳۴	۴۳۷۵
M_W	m	-	۶۲۳	۸۰۶	۱۳۲۵
r_c	m	-	۳۸۲	۴۹۶	۸۳۹
θ / π	rad	-	۰/۵۶	۰/۴۸	۰/۳۹
ω / π	rad	-	۰/۳۶	۰/۳۶	۰/۳۵
d	m	۵/۲۶	۶/۹۹	۴/۸۶	۳/۹۷
S_V	-	۰/۰۰۰۳۴	۰/۰۰۰۴۴	۰/۰۰۰۲۶	۰/۰۰۰۱۱
S_r	-	۰/۰۰۰۳۴	۰/۰۰۰۲۸	۰/۰۰۰۲۱	۰/۰۰۰۰۹
P	-	۱	۱/۵۷	۱/۲۴	۱/۱۷

به منظور سنجش درستی مدل توسعه یافته در این پژوهش، مقادیر پارامترهای هندسی مئاندرهای رودخانه سیستان که طبق روند یاد شده قبلی تخمین زده شده اند با مقادیر شهودی مقایسه شده اند. برای این منظور در جدول (۴) پارامترهای محاسباتی و مشاهداتی به تفکیک برای هر یک از بازه ها عنوان شده اند. شایان گفتن است که در بازه شماره ۱، چون $P = ۱$ است در نتیجه رودخانه در حالت مستقیم جریان دارد و در نتیجه مئاندری در آن دیده نمی‌شود و بنابراین مدل برای سایر بازه ها استفاده شده است.

۸- بحث و نتیجه گیری

مطالعه و مدلسازی شکل هندسی مئاندرهای رودخانه در پلان با استفاده از مختصات قطبی (مدل سینوسی) راهکار مناسبی برای تعیین روابط بین پارامترهای هندسی مئاندرهای رودخانه است. هدف اصلی از انجام این تحقیق توسعه یک مدل برای بررسی رابطه بین پارامترهای هندسی مئاندرهای رودخانه و مقدار ضریب سینوسیته بود.

در راستای این تحقیق، رابطه حداکثر مقدار زاویه بین خط مماس بر هر نقطه از محور رودخانه و امتداد افق (ω) با ضریب سینوسیته (P) به صورت یک تابع بسل تعیین شد. همچنین رابطه بین شعاع انحناء مئاندر در محل رأس خم (r_c) و مقدار ضریب سینوسیته به صورت یک تابع لژاندر بدست آمد. در گام آخر، روابط بین سایر پارامترهای هندسی مئاندرهای رودخانه و ضریب سینوسیته به صورت معادلاتی کاربردی تعیین گردید.

اگرچه ضریب سینوسیته پارامتری مورفولوژیک است ولی در پروژه های ساماندهی و اصلاح مسیر رودخانه به کمک عملیات نقشه برداری می‌توان در بازه های مشخصی از رودخانه مقادیر شیب دره و شیب طولی رودخانه را بدست آورد و به کمک آن ضریب سینوسیته را محاسبه کرد. سپس، با توجه به گامهای ارائه شده در این تحقیق می توان پارامترهای هندسی مئاندرهای رودخانه (طول کمان خم، شعاع انحناء مئاندر در محل رأس خم، عمق جریان پر در محل رأس خم و ...) و نحوه توسعه آنها را تخمین زد و با توجه به آن نسبت به جانمائی و طراحی سازه های مورد نیاز به منظور تثبیت سواحل و ... اقدام کرد.

رودخانه سیستان رودخانه ای پیر است که در دشت رسوبی جریان دارد. دبی جریان، بار رسوبی و بناهای هیدرولیکی موجود، عامل تشدید مئاندری شدن این رودخانه شده اند. کاربرد مدل سینوسی نتایج قابل قبولی در مورد مئاندرهای این رودخانه نشان داد و مقایسه انجام شده نشانگر وجود همبستگی مناسبی بین پارامترهای هندسی تخمین زده شده و مقادیر مشاهداتی است.

مقایسه بین مقادیر مشاهداتی و پارامترهای هندسی مئاندرهای رودخانه سیستان که در بازه های مختلف تخمین زده شده اند، نشانگر دقت بسیار خوب این روش است. برای مثال در جدول (۴) پارامتر محاسباتی $\frac{L_m}{M_L}$ در مقایسه با پارامترهای مشاهداتی، به طور میانگین دارای ضریب تعیین $R^۲ = ۰/۹۶۲۳$ است. همین مقایسه در مورد پارامتر $\frac{M_w}{M_L}$ نشانگر همخوانی مناسبی با ضریب تعیین $R^۲ = ۰/۸۹۲۹$ است.

همانطور که گفته شد در فرضیات مدل توسعه یافته در این تحقیق، مئاندرها آزاد فرض شده‌اند در حالیکه در واقعیت این امر کمتر رخ می‌دهد و عوامل مختلف طبیعی (تغییرات اقلیمی و تغییر جنس مصالح کناره های رودخانه) و انسانی (احداث بناهای آبی و برداشت شن و ماسه از رودخانه) روند توسعه مئاندرها را تغییر می‌دهد و در نتیجه باعث بروز اختلاف بین مقادیر محاسباتی و مشاهداتی می‌شود. با دانستن این مطلب، نتایج حاصل از مدل توسعه یافته در این پژوهش در مقایسه با مقادیر مشاهداتی از دقت بسیار خوبی برخوردار بوده است.

۹- ليست علامتهاي اصلي در معادلات

A : سطح مقطع جریان ($L^۲$)

C : ضریب شزی ($L^{\frac{۱}{۲}}T^{-۱}$)

d : عمق جریان متناظر با دبی مقطع پر رودخانه (L)

g : شتاب ثقل ($LT^{-۲}$)

k : عدد موج ($L^{-۱}$)

L_m : طول کمان مئاندر (L)

L_r : طول تالوگ رودخانه (L)

L_v : طول دره رودخانه (L)

M_L : طول موج (L)

M_ω : عرض مئاندر (L)

P : ضریب سینوسیته ($-$)

r : شعاع انحناء (L)

r_c : شعاع انحناء مئاندر در رأس خم (L)

s : فاصله هر نقطه در روی محور نسبت به مبدا (L)

S_r : شیب طولی رودخانه ($-$)

S_v : شیب دره رودخانه ($-$)

x : طول خط افق رودخانه (L)

Y : انحراف امتداد رودخانه نسبت به محور x ها (L)

Y_0 : حداکثر مقدار Y و برابر نصف دامنه موج (L)

κ : ثابت فون کارمن ($-$)

θ : زاویه مماس بر محور مرکزی رودخانه و امتداد محور x ها ($-$)

ω : حداکثر مقدار θ ($-$)

جدول(۴): مقایسه بین پارامترهای هندسی محاسباتی و مقادیر مشاهداتی در رودخانه سیستان

پارامتر	بازه ۱	بازه ۲		بازه ۳		بازه ۴	
		مشاهداتی	محاسباتی	مشاهداتی	محاسباتی	مشاهداتی	محاسباتی
$\frac{L_m}{M_L}$	1	۱/۴۲	۱/۵۷	۱/۳۳	۱/۲۴	۱/۲۸	۱/۱۷
$\frac{\omega}{\pi}$	~	۰/۳۶	۰/۴۱	۰/۳۶	۰/۲۹	۰/۳۵	۰/۲۴
$\frac{M_W}{M_L}$	~	۰/۳۶	۰/۵۹	۰/۲۶	۰/۳۸	۰/۲۷	۰/۳۱
$\frac{L_m}{r_c}$	~	۸/۴۴	۸/۰۹	۵/۸۳	۵/۷۲	۶/۶۷	۴/۷۴
$\frac{M_L}{r_c}$	~	۴/۳۰	۵/۱۵	۴/۲۴	۴/۶۱	۴/۲۱	۴/۰۵
d	~	۶/۷۱	۶/۹۹	۴/۸۳	۴/۸۶	۳/۸۲	۳/۹۷

۱۰- مراجع

[۱] شرق آرا، بابک؛ تهیه مدل ریاضی برای تحلیل شکل هندسی مئاندرهای رودخانه سیستان، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۷۴.

[۲] Chitale, S. V.; "Theories and Relationships of River Channel Patterns", Journal of Hydrology, Vol. 19, pp. 285-308, 1970.

[۳] Ferreira Dasilva, A. M; "On Why and How Do Rivers Meander", Journal of Hydraulic Research, Vol. 44, pp. 579-590, 2006.

[۴] Janson, P.; Principles of River Engineering, Pitman Publishers, 1983.

[۵] Langbein.W; Leoplod.L; "River Meanders-Theory of Minimum Variance", USGS Professional paper, pp. 15, 1966.

[۶] Leopold, L. C.; Wolman, M. G.; Miller, J. P.; Fluid Process in Geomorphology, Freeman Publishers, San Francisco, pp. 522, 1964.

[۷] Rozovski, I. L.; "Flow of water in Bends of Open Channels", Academy of science of the Ukrainian, SSR, Kiev, 1963.

[۸] Shen, H.W.; Modeling of Rivers, John Wiley & Sins Inc. Publishers, USA, 1979.

[۹] Thin, k.; River plan-form movement in an alluvial plain, Ph.D. Thesis, Delf University, A. A. Balkema Publishers, Netherlands, 1994.

[۱۰] Yalin, M. S.; River Mechanics, Pergamon Press, Great Britain, pp. 161-176, 1992.