

## مدل ریاضی پیش بینی فرسایش کناری در پیچانرودها

مهدی حبیبی

دانشیار پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری

نصرا... جواهری

دانشجوی دکتری دانشگاه شهید چمران - اهواز

(تاریخ دریافت ۷۹/۱۲/۲، تاریخ تصویب ۸۲/۲/۲۰)

### چکیده

در این تحقیق با استفاده از روش حجمهای محدود یک مدل ریاضی دو بعدی برای پیش بینی تغییرات مورفولوژی رودخانه توسعه داده شده است. نرم افزار تهیه شده را می توان برای محاسبه فرسایش کناری و رسوبگذاری در حلقه های پیچانرود، مورد استفاده قرار داد. در مدل تهیه شده ابتدا با حل معادلات انرژی، انتشار سرعت و مومنتم، پارامترهای جریان نظیر توزیع سرعتهای اصلی جریان، سرعتهای ثانویه، توزیع تنش های اصلی، توزیع تنشهای ثانویه و تنش برشی بحرانی محاسبه می گردد. سپس با محاسبه سرعت بحرانی و مقایسه آن با سرعت طولی جریان، میزان انتقال رسوب در جهت طولی، در هر زیر مقطع محاسبه می شود. با مقایسه نسبت تنشهای برشی بستر محاسبه شده در دو جهت اصلی و محاسبه تبادل رسوب بین زیر مقطعها بر اساس معادله پیوستگی، میزان رسوبات منتقل شده در جهت عرضی (با فرسایش) تعیین می گردد. به این ترتیب پارامتر فرسایش پذیری در هر مقطع محاسبه و با استفاده از مدل موج پرودیک تغییر شکل آینده پلان پیش بینی می شود.

### واژه های کلیدی: رسوب، جریان، فرسایش، پیچانرود، حجم محدود

### مقدمه

فرسایش کناری در پیچ رودخانه هر ساله خسارات زیادی را به زمینهای کشاورزی، ساختمانها و سازه های کنار رودخانه، جاده ها، پلها و ... وارد می کند و بعلاوه باعث انتقال مقادیر قابل توجهی رسوب به مخازن سدها می شود. به عنوان مثال ۸۴٪ رسوبات ورودی به مخزن سد سفیدرود از طریق رودخانه قزل اوزن وارد مخزن سد می شود که از این مقدار ۱۶٪ آن مربوط به پدیده فرسایش کناری است. بنابراین شناخت پدیده فرسایش کناری در پیچانرودها و پیش بینی میزان جابجایی پیچ در هر دوره زمانی برای مدیریت و بهره برداری بهینه از رودخانه امری اجتناب ناپذیر می باشد. یکی از شیوه های محاسبه و پیش بینی فرسایش در پیچ رودخانه ها استفاده از مدل های ریاضی است.

برای تهیه یک مدل ریاضی که بتواند فرسایش کناری را محاسبه نماید مراحل زیر را باید طی نمود:

الف- تعیین پروفیل سطح آب

ب- تعیین پروفیل های توزیع سرعت های اصلی و ثانویه

ج- تعیین مقادیر انتقال رسوب در جهات طولی و عرضی و محاسبه پارامترهای فرسایش کناری

د- محاسبه فرسایش کناری و پیش بینی تغییر شکل پلان

### معادلات حاکم

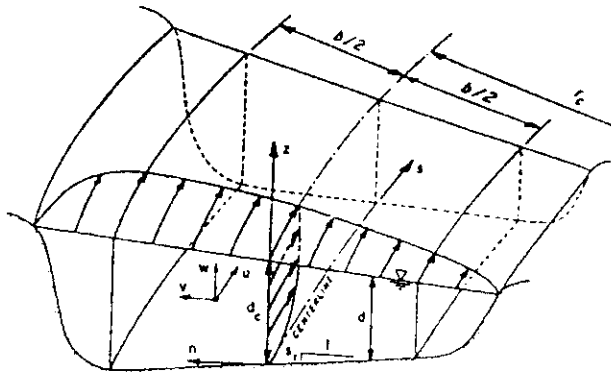
تعیین رقوم سطح آب در مقطع عرضی

چون شکل مقطع جریان، ضریب زبری و بطور کلی مشخصات مجرا در رودخانه های طبیعی نسبت به فاصله تغییر می کند و معمولاً مشخصات هندسی مقاطع عرضی رودخانه فقط برای تعداد معینی از مقاطع برداشت می شود لازم است که از روش تعیین عمق از روی فاصله (روش گام به گام استاندارد) برای محاسبه پروفیل سطح آب استفاده شود. اساس این روش تخمین عمق جریان در یک مقطع و اصلاح آن با آزمون و خطا با استفاده از معادله انرژی (رابطه ۱) تا حصول نتیجه مناسب می باشد.

$$Z_2 + y_2 + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} = Z_1 + y_1 + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} + h_f + h_e$$

(۱)

در رابطه (۱)  $h_f$  و  $h_e$  به ترتیب تلفات انرژی ناشی از اصطکاک و وجود جریانهای گردابی می باشد. که مقدار  $h_f$  با استفاده از رابطه



شکل ۱: نمایش بردارهای سرعت در خم رودخانه‌ها.

مقدار سرعت سطحی در فرض اولیه می‌تواند بین ۱/۵ ~ ۱ برابر سرعت متوسط جریان در نظر گرفته شود مع الوصف برای رسیدن به جواب سریع، استفاده از روشهای تجربی موجود برای تعیین سرعت سطحی جریان بسیار مؤثر است. در مدل تهیه شده با فرض توزیع لگاریتمی سرعت، معادله زیر برای تعیین سرعت سطحی جریان استفاده شده است.

$$U = U \frac{\kappa(R^{1/6}/n\sqrt{g}) + 1}{\kappa(R^{1/6}/n\sqrt{g})} \quad (۴)$$

نتایج بدست آمده از حل مدل نشان می‌دهد که در صورت استفاده از معادله فوق زمان محاسبه حداقل ۵۰٪ کاهش خواهد یافت. در این معادله U سرعت متوسط جریان، U سرعت جریان در سطح آب،  $\kappa$  ثابت فن کارمن، R شعاع هیدرولیکی، n ضریب زبری مانینگ و g شتاب ثقل می‌باشد.

### سرعت‌های ثانویه

برای تعیین سرعت‌های ثانویه از رابطه (۳) که معادله مومنتم جریان است استفاده می‌شود. حل این رابطه با تعیین مقادیر سرعت متوسط در نقاط میدان امکان پذیر خواهد بود زیرا شکل هندسی مقاطع عرضی متوالی متفاوت بوده و امکان ارتباط بین گروه‌ها با روشهای معمول اختلافهای محدود وجود ندارد. مهمترین وجه تمایز این مدل از سایر مدل‌های پیشنهادی حل مستقیم رابطه (۳) است که با توجه به تعیین سرعت اصلی جریان بر مبنای معادلات انتشار بدست آمده است. شکل (۲) نحوه انفصال معادلات

مانینگ محاسبه شده و مقدار  $h_e$  با توجه به میزان تنگ شدگی یاباز شدگی مقاطع و با توجه به روابط موجود در مراجع هیدرولیک به صورت درصدی از  $h_f$  انتخاب می‌شود. با محاسبه عمق جریان از این رابطه، عملاً سطح آب در عرض پیچ ثابت در نظر گرفته می‌شود.

### توزیع سرعت‌های اصلی و ثانویه در مقطع عرضی

در حالت کلی جریان در پیچ رودخانه دارای ۳ مؤلفه در جهات S (مسیر اصلی)، n عمود بر مسیر اصلی در صفحه افق) و Z (قائم بر مسیر اصلی) می‌باشد. معادلات دیفرانسیل حاکم بر جریان در پیچ رودخانه به صورت سه بعدی توسط رزونسکی (۱۹۷۵) ارائه شده‌اند.

به دلیل آنکه حل سیستم معادلات سه بعدی علاوه بر وقت بر بودن، حافظه بسیار بالای کامپیوتر را می‌طلبد، در تحقیق حاضر معادلات برای حالت دو بعدی ساده شده‌اند. بنا به توصیه اودگارد (۱۹۸۹) به دلیل کم بودن عمق جریان نسبت به عرض در مجاری طبیعی از تغییرات سرعت عمقی جریان صرف نظر شده و تنها سرعت جریان در جهات S و n ( $u$  و  $v$ ) محاسبه می‌گردند. با این فرض معادلات ساده شده به کار رفته در مدل به شرح زیر بدست آمده‌اند (شکل ۱).

$$\frac{\partial^2 u}{\partial n^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial s^2} = 0 \quad (۲)$$

$$u \frac{\partial u}{\partial s} + v \frac{\partial u}{\partial n} + \frac{uv}{r} = -1/\rho \frac{\partial p}{\partial s} + F_s \quad (۳)$$

که در این معادلات T شعاع انحنای خم، p فشار،  $F_s$  فرم اصطکاک و  $\rho$  دانسیته سیال می‌باشد. برای تعیین توزیع سرعت‌ها در مقطع عرضی، معادله (۲) که معادله انتشار سرعت در مقطع عرضی است با استفاده از روش حجم‌های محدود منفصل می‌گردد تا به یک معادله جبری تبدیل شود. این معادله بر روی کلیه نقاط میدان حل اثر داده شده و یک دستگاه معادله  $\Delta$  قطری تشکیل می‌گردد که با اعمال روشهای مختلف قابل حل خواهد بود.

به عنوان شرایط مرزی لازم است سرعت جریان در سطح آب و در کناره‌ها تعیین شود. در این تحقیق سرعت جریان در جداره‌ها معادل صفر در نظر گرفته می‌شود و برای تعیین سرعت جریان در سطح آب ابتدا یک سرعت مناسب فرض می‌شود و بر این اساس سیستم معادلات حل می‌گردند. سپس برای اطمینان از درستی فرض مذکور مقادیر جریان عبوری از هر جزء سطح محاسبه شده و باکل جریان عبوری از مقطع مقایسه می‌شوند.

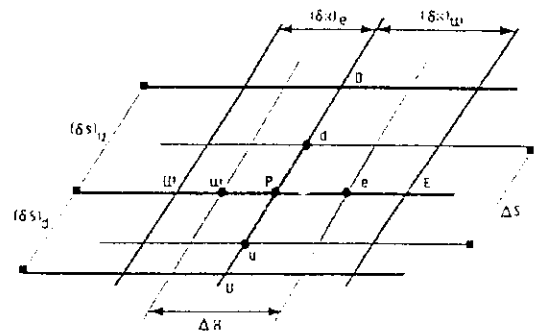
را نشان می دهد.

زیر قابل محاسبه خواهد بود (اودگارد، ۱۹۸۹)

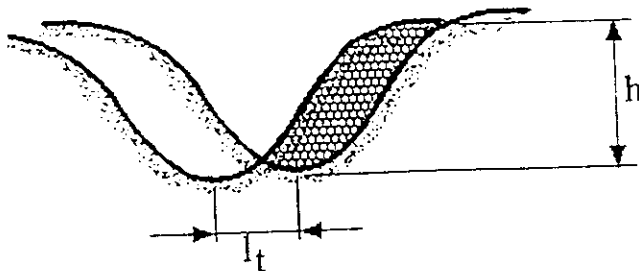
$$V_{ij} = V'_{ij} + 2 V'_s \left( \frac{Z_{ij}}{d_{ij}} - 1/2 \right) \quad (7)$$

که در آن  $m$  نمای معادله توزیع سرعت جریان در مقطع عرضی می باشد.

$$V'_s = \bar{v} \left( \frac{1}{\kappa^2} \frac{2m^2 + 3m + 1}{2m^2 + m + 1} \frac{d_{ij}}{r_{ij}} \right) \quad (8)$$



شکل ۲: نحوه انفصال معادلات جریان.



شکل ۳: نمایش تغییرات شکل مقطع در اثر فرسایش کناری.

برای حل رابطه (۳) باید از هر دو نوع انفصال پسرو و پیشرو<sup>۱</sup> استفاده شود زیرا سرعتهای ثانویه جریان سرعتهایی هستند که امکان دارد از مقطعی به مقطع دیگر تغییر جهت داده و شرایط فیزیکی حاکم بر معادلات را عوض کنند. از اینرو مدل باید به گونه‌ای تهیه شود که بتواند با توجه به شرایط مختلف فرم مناسب معادله را مورد استفاده قرار دهد. چنانچه معادله (۳) به دو فرم پسرو و پیشرو انفصال یابد معادلات زیر بدست می آیند.

$$\bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial s} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial n} - \frac{\bar{u} \bar{v}}{r} = g_{st} - \frac{\tau_{bs}}{\rho d} \quad (5)$$

$$\bar{v}_p = \frac{(g_{st} - \tau_{bs}/\rho d) \Delta x \Delta s - \Delta x/2 \bar{u}_p (\bar{u}_d - \bar{u}_u)}{\Delta s/2 (\bar{u}_e - \bar{u}_w) + \Delta s \Delta x/R \bar{u}_p} \quad (6)$$

معادله (۵) با متوسط گیری از معادله (۳) و جایگزینی ترمهای  $F_s$  و  $\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s}$  به ترتیب با  $g_{st}$  و  $\frac{\tau_{bs}}{\rho d}$  ساده کردن بدست آمده است. پارامترهای معادله (۶)

$\bar{v}_p$ : بردار سرعت در جهت قائم در نقطه p

$\bar{u}_p$ : بردار سرعت در جهت جریان در نقطه p

$\bar{u}_d$ : بردار سرعت در جهت قائم در نقطه d

$\bar{u}_u$ : بردار سرعت در جهت قائم در نقطه u

$\bar{u}_e$ : بردار سرعت در جهت قائم در نقطه e

$\bar{u}_w$ : بردار سرعت در جهت قائم در نقطه w

$\Delta x$ : فاصله گره‌ها روی شبکه در جهت عمود بر مسیر جریان

$\Delta s$ : فاصله گره‌ها روی شبکه در جهت جریان

پس از آنکه سرعتهای ثانویه برای نقاط مختلف میدان مشخص شدند، مقادیرشان در نقاط مختلف گره‌های شبکه از طریق رابطه

### تعیین دبی رسوب در جهت طولی

#### الف) رودخانه‌های با مصالح بستر غیر چسبنده

برای تعیین میزان دبی رسوب در آبراهه‌های با مصالح بستر غیر چسبنده روش سرعت بحرانی مورد استفاده قرار گرفته است. در این روش توان حمل رسوب جریان عامل انتقال ذرات است. حالتی را که جریان توان لازم را برای انتقال ذرات ندارد و ذرات بستر در آستانه حرکت قرار گرفته‌اند حالت بحرانی و سرعت جریان در این حالت را سرعت بحرانی می‌گویند شیکسما (۱۹۸۶) سرعت بحرانی  $V_c$ ، و بر اساس آن پتانسیل حمل رسوب جریان  $q_{st}$  را به صورت زیر بیان نمود:

$$V_c = \alpha \left[ \left( \frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) g \right]^{0.5} D_s^3 d^{1/5} \quad (9)$$

$$q_{st} = \beta D_s (V - V_c) \left( \frac{V^3 - V_c^3}{V_c^3} \right) \quad (10)$$

در معادلات بالا:

$\rho_s$  = وزن مخصوص مصالح بستر؛  $\rho$  = جرم ویژه آب؛

$g$  = شتاب ثقل؛  $D_s$  = قطر متوسط ذرات بستر؛  $d$  = عمق

متوسط جریان آب؛  $q_{st}$  = دبی حجمی رسوبات در جهت طولی در

واحد عرض کانال؛ و  $\alpha$  و  $\beta$  = ضرایب کالیبراسیون معادلات که از

خاکهای غیر چسبنده، و با در نظر گرفتن قطر معادل میزان دبی رسوبی خاکهای چسبنده را محاسبه کرد.

در شرایطی که خاک علاوه بر چسبنده بودن دارای ذرات درشت دانه باشد قطر ذره معادل بصورت زیر محاسبه خواهد شد [شیکسما (۱۹۸۶)].

$$D_e = D_s + D_e \quad (16)$$

### تعیین دبی رسوب در جهت عرضی

با توجه به اینکه عوامل متعددی بر پدیده انتقال رسوب در آبراهه‌های طبیعی تأثیر می‌گذارند که در بعضی موارد ناشناخته‌اند و یا اثراتی بر یکدیگر می‌گذارند پیچیده و ناشناخته است، هنوز با قطعیت نمی‌توان گفت که چه مقدار از رسوبات و در چه جهتی انتشار می‌یابند. عده‌ای از محققین حرکت رسوبات را یک بعدی فرض می‌کنند و عده‌ای دیگر اذعان دارند که بخشی از رسوبات در جهت عرضی نیز انتشار می‌یابد و به بیان دیگر حرکت دو بعدی رسوبات رامطرح می‌کنند. پارکر و اندروز (۱۹۸۵) و اوودگارد (۱۹۸۹) رابطه زیر را برای انتقال و انتشار رسوبات در جهت عرضی ارائه نموده‌اند.

$$q_n = q_s \left( \frac{\tau_{bn}}{\tau_{bs}} + B S_n \frac{\theta \rho \Delta g D}{\tau_{bs}} \right) \quad (17)$$

که در آن:

$\tau_{bn}$  و  $\tau_{bs}$  = به ترتیب تنش برشی در جهات طولی و عرضی

$\theta$  = تابع بدون بعد تنش برشی بحرانی شیلدز  $\frac{\tau_{sr}}{\Delta g D}$

$B$  = تابع اصطکاک کلمب  $\frac{1 + \Psi \mu}{\mu}$  که در آن  $\mu = 0.43$  و  $\Psi = 0.85$

پیشنهاد شده است (مقدار  $B$  بر اساس تجربیات اکی‌دا و

شی‌مورا (۱۹۸۵) بین ۳ تا ۶ گزارش شده است)

$S_n$  = شیب بستر رودخانه در جهت عرضی<sup>۳</sup>

$\Delta = \left( \frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right)$  که تقریباً معادل  $1/65$  فرض می‌شود.

$D$  = قطر مصالح بستر یا قطر معادل ذرات بستر

تنشهای برشی وارد بر بستر جریان در جهات طولی و عرضی

بصورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$\tau_{bs} = \rho \kappa^2 U_i^2 / m^2 \quad (18)$$

$$\tau_{bn} = \rho \kappa^2 V_i^2 / m^2 \quad (19)$$

مقایسه نتایج مدل با اندازه‌گیری‌های واقعی بدست می‌آیند ( در صورت عدم وجود اطلاعات  $\alpha = 0.1$  و  $\beta = 0.005$  معادلات (۹) و (۱۰) برای خاکهای غیر چسبنده با قطر بزرگتر از  $0.24$  میلیمتر قابل کاربرد هستند.

### ب) رودخانه‌های با مصالح بستر چسبنده

مهمترین روش تعیین میزان انتقال رسوب خاکهای چسبنده استفاده از توان فرسایش جریان<sup>۲</sup> است. توان فرسایشی جریان که بطور مستقیم با تنش برشی متناسب است تابعی از سرعت جریان است بطوریکه رابطه  $V$  و  $\sqrt{\tau}$  یک رابطه مستقیم است. عبارت دیگر توان مقابله خاک در برابر فرسایش را می‌توان معادل سرعتی از جریان در نظر گرفت که در آن هیچ‌گونه فرسایشی وجود نداشته‌باشد. این سرعت که با  $V_{01}$  نمایش داده می‌شود با مقاومت برشی خاک ( $\tau$ ) متناسب است و چون

$$\tau = \sigma g \phi + C \quad (11)$$

و در خاکهای چسبنده ضریب ( $\phi$ )  $1g$  خیلی کم و پارامتر  $\sigma g (\phi)$  قابل اغماض است،  $V_{01}$  با  $C^{1/2}$  رابطه خطی بصورت زیر خواهد داشت:

$$V_{01} = A \sqrt{C} \quad (12)$$

که در این روابط ( $\phi$ ) زاویه اصطکاک داخلی مصالح بستر رودخانه،  $\sigma$  تنش قائم خاک،  $C$  چسبندگی خاک و  $A$  ضریب تناسب است. براساس نتایج بدست آمده از مطالعات آزمایشگاهی مقدار ضریب  $A$ ، معادل  $0.3149$  می‌باشد و بنابراین:

$$V_{01} = 0.3149 \sqrt{C} \quad (13)$$

این سرعت را می‌توان سرعت آستانه فرسایش قلمداد نمود و برای محاسبه میزان فرسایش در خاکهای چسبنده به کاربرد. چنانچه در رابطه (۹) مقدار  $\frac{\rho_s}{\rho} = 2.65$  فرض شود برای جریانی با عمق یک متر مقدار  $V_c$  را می‌توان به شرح زیر بدست آورد.

$$V_c = 0.40212 D_s^3 \quad (14)$$

آنگاه با قرار دادن  $V_{01} = V_c$ ، قطر ذره معادل که با اندیس  $e$  نشان داده می‌شود به صورت زیر تعیین می‌گردد.

$$D_e = 0.9217 C^{1/6} \quad (15)$$

باین ترتیب می‌توان با استفاده از روابط مربوط به انتقال رسوب در

نمایش داده می‌شود.

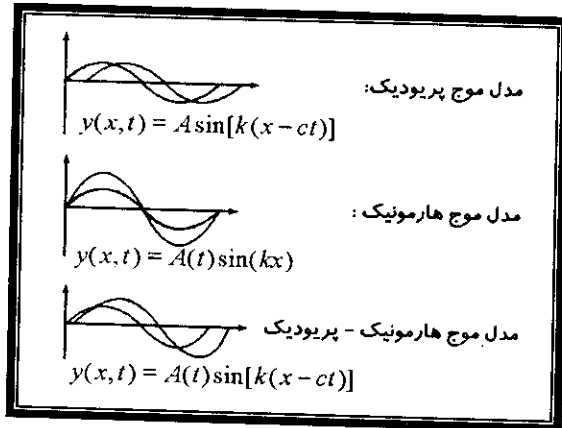
$$y(x) = A(t) \sin(kx)$$

(۲۴)

ج - مدل موج هارمونیک - پریودیک: (مدل توسعه دو بعدی طولی و عرضی) که به صورت زیر نمایش داده می‌شود.

$$y(x,t) = A(t) \sin [k(x-ct)]$$

(۲۵)



شکل ۴: نمایش مشخصه‌های انواع مدل‌های موج.

از آنجا که مسیر طبیعی یک رودخانه، مسیری غیر منظم است لازم است معادله دیفرانسیل موج هارمونیک-پریودیک با استفاده از روشهای عددی مناسب حل و با جایگزینی پارامترهای هیدرولیکی - رسوبی مناسب، تغییر شکل رودخانه پیش بینی گردد. معادله دیفرانسیل موج هارمونیک - پریودیک یا مشتق گیری از معادله (۲۵) بصورت زیر بدست می‌آید

$$\frac{\partial y}{\partial t} = \frac{A(t)}{A(t)} y + c \frac{\partial y}{\partial x}$$

(۲۶)

که در آن  $\frac{A'(t)}{A(t)}$  نسبت توسعه دامنه‌ای (PA) و c سرعت انتقال موج نامیده می‌شوند که بر اساس مدل پیشنهادی فرسایش کناری اودگارد (۱۹۸۹) قابل محاسبه می‌باشند.

معادله دیفرانسیل موج هارمونیک - پریودیک که یک موج سینوسی ساده تابع زمان و مکان است برای شرایطی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد که نقاط عطف جایی که مراکز انحنای مسیر پلان از یک طرف رودخانه به طرف دیگر انتقال می‌یابد (بر روی محوری که مبنای حل معادلات است (محور x ها) قرار گیرند از آنجا که پلان مسیر طبیعی یک رودخانه در حقیقت متشکل از چندین موج ساده است که بر روی یک محور انتقال حرکت کرده‌اند لذا لازم است قبل

## پیش بینی فرسایش کناری

مطالعات متعددی به منظور پیش بینی فرسایش کناری انجام گرفته است. اودگارد (۱۹۸۹) اذعان می‌دارد که مدل‌های فرسایش کناری مبتنی بر تناسب خطی شدت فرسایش کناری با عمق آبستنگی در کناره بالاترین ضرایب همبستگی را با نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌ها در طبیعت داشته‌اند. بر این اساس چنانچه  $h_{bank}$  عمق جریان در کناره و  $h_o$  عمق جریان در خط مرکزی کانال باشد، شدت فرسایش کناری  $V_e$  بصورت زیر بیان می‌شود.

$$V_e = E' u_o \left( \frac{h_{bank}}{h_o} - 1 \right)$$

(۲۰)

که در آن  $E' =$  پارامتر فرسایش پذیری و  $u_o =$  متوسط سرعت در خط مرکزی کانال می‌باشد.

از طرفی چنانچه دبی رسوبات در جهت عرضی  $q_n$  باشد.

$$q_n = l_t \cdot h \cdot V_e$$

(۲۱)

که در آن  $l_t$  متوسط فاصله‌ای است که رسوب در جهت عرضی منتقل می‌شود (جائیکه  $\tau_{bn} > \tau_{cr}$  است تا جائیکه  $\tau_{bn} < \tau_{cr}$  می‌شود) و  $h$  ارتفاع فرسایش یافته کناری است (شکل ۱).

به این ترتیب پارامتر فرسایش پذیری بصورت زیر محاسبه می‌گردد.

$$E' = \left( \frac{q_n}{l_t \cdot h \cdot u_o} \right) / \left( \frac{h_{bank}}{h_o} - 1 \right)$$

(۲۲)

در تحقیق حاضر معادله اخیر برای محاسبه تغییر شکل پلان رودخانه استفاده شده است.

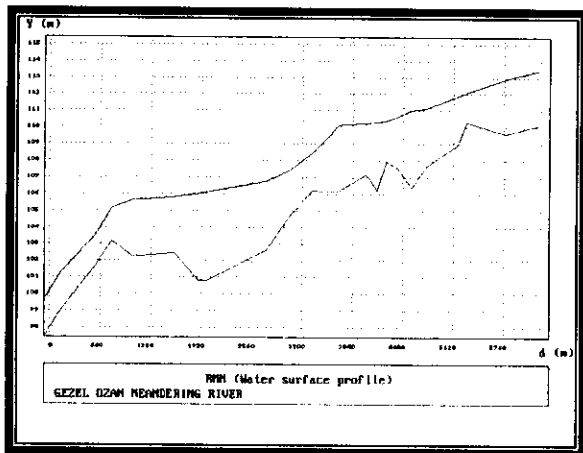
## مدل پیش بینی تغییر شکل پلان

توسعه فرسایش کناری در مقاطع بین رودخانه موجبات تغییر مسیر رودخانه را با گذشت زمان فراهم می‌سازد و این توسعه می‌تواند یک بعدی یا دو بعدی باشد. مدل‌های پیش بینی تغییر شکل پلان رودخانه، در حقیقت همان معادلات امواج هارمونیک، پریودیک یا هارمونیک-پریودیک هستند که به شرح زیر تقسیم بندی می‌شود و در شکل (۴) بصورت شماتیک نشان داده شده‌اند. الف- مدل موج پریودیک: (مدل توسعه طولی) که به صورت زیر نمایش داده می‌شود.

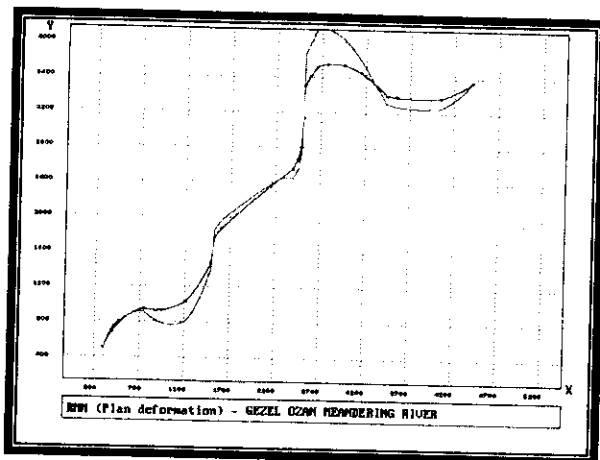
$$y(x) = A \sin [k(x-ct)]$$

(۲۳)

ب - مدل موج هارمونیک: (مدل توسعه عرضی) که به صورت زیر

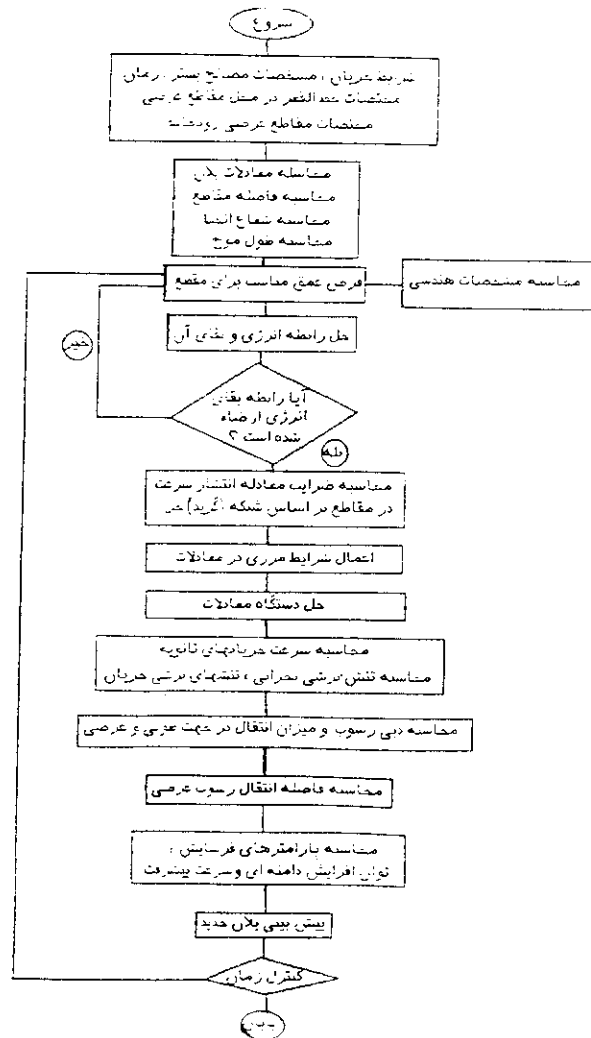


شکل ۷: پروفیل سطح آب محاسبه شده توسط مدل در دبی ۲۰۰ متر مکعب بر ثانیه.

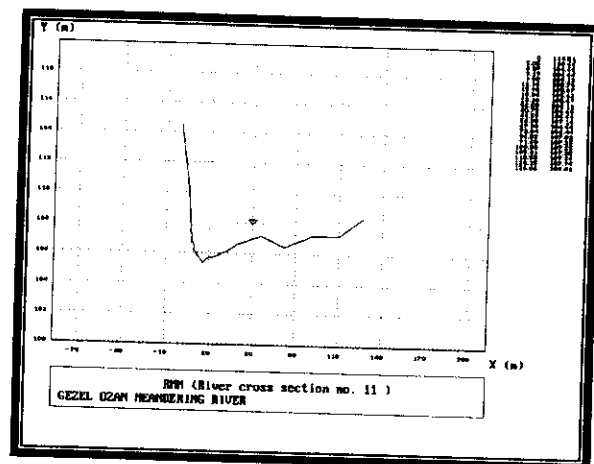


شکل ۸: نمایش تغییر کل پلان رودخانه در دبی ۲۰۰ متر مکعب بر ثانیه پس از ۴۰ دقیقه.

از محاسبه تغییر شکل پلان ابتدا تصویر آن را بر روی محور Xها محاسبه نموده و پس از محاسبه تغییر شکل با معادله دیفرانسیل مذکور، مجدداً بر روی محور انتقال اصلی تصویر شود. باین ترتیب معادله دیفرانسیل کلی تغییر فرم پلان که مستقل از شکل‌های موضعی حلقه‌های پیچانرود می‌باشد محاسبه می‌گردد. این معادله

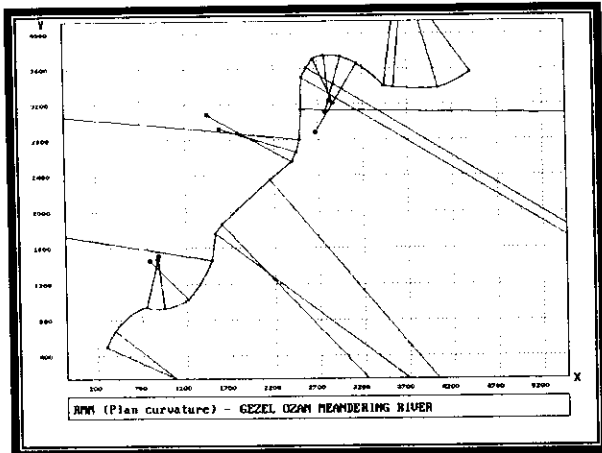


شکل ۵: مراحل محاسبات فرسایش کناری در مدل RMM.

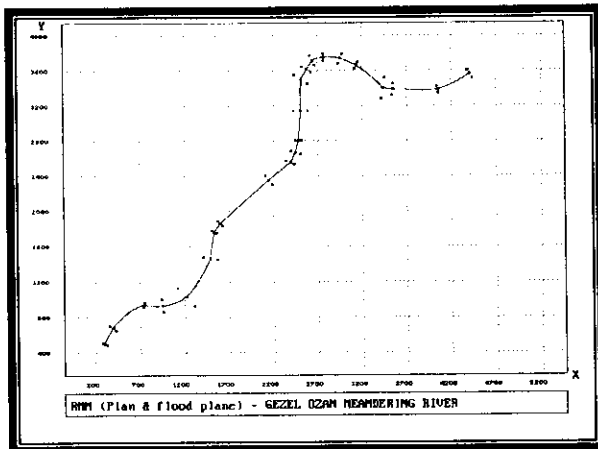


شکل ۶: نمایش مقطع عرضی و سطح آب محاسبه شده در دبی سیلابی ۲۰۰ متر مکعب بر ثانیه.

گرفتند، مدل فوق پروفیل طولی سطح آب، پروفیل سطح آب در مقاطع عرضی، محدوده سیل گیر رودخانه، معادلات پلان رودخانه، مراکز و شعاع‌های دوائر انحنا خم‌های رودخانه، توزیع سرعتها و انتقال رسوب را محاسبه و در نهایت تغییر شکل پلان رودخانه را در دبی سیلابی مورد نظر و پس از زمان مورد نظر محاسبه نمود که نتایج آن در شکل‌های (۶) تا (۱۱) آمده است.



شکل ۱۰: نمایش پلان رودخانه - مراکز و شعاع دوائر انحنای مسیر.



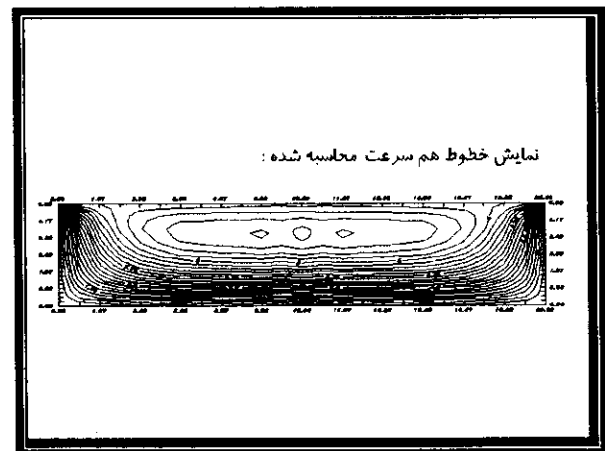
شکل ۱۱: نمایش تغییرکل پلان رودخانه به همراه محدوده سیل‌گیر در دبی ۲۰۰ متر مکعب بر ثانیه پس از ۴۰ دقیقه.

### پیشنهادات

۱- توسعه زیر برنامه انتقال رسوب مدل برای سایر روشهای انتقال رسوب و همچنین روابط موجود بین انتقال رسوب و سرعت جریان

را می‌توان برای تمام نقاط پلان رودخانه با استفاده از روشهای ریاضی مناسب منفصل نمود و برای محاسبه تغییر شکل پلان بکار برد. در این تحقیق از روش حجمهای محدود برای انفصال معادلات استفاده شده است. روش حل Implicit بوده و ماتریس محاسبه شکل جدید پلان با استفاده از روش TDMA حل شده است. خط مرکزی رودخانه به عنوان شرط اولیه حل معادلات انتخاب شده است.

با محاسبه مشخصات هیدرولیکی و معادلات پارامتری رودخانه، تغییر شکل آتی پلان قابل پیش بینی خواهد بود. الگوریتم محاسبات فرسایش کناری در شکل (۵) نشان داده شده است.



شکل ۹: نمایش توزیع سرعتها در مقطع ۴ در دبی ۲۰۰ متر مکعب بر ثانیه.

### کاربرد مدل در رودخانه قزل اوزن

اطلاعات اولیه مورد نیاز از طریق برداشت‌های صحرائی و جمع‌آوری آمار و ارقام و در موارد عدم دسترسی با حدس مناسب مهندسی بدست آمدند. این اطلاعات عبارت بودند از:

- ۱- دبی‌های سیلابی رودخانه (که از تحلیل آمار و دبی بدست آمدند).
- ۲- نوع مصالح بستر و کناره‌ها (با برداشت‌های صحرائی بدست آمدند).
- ۳- منحنی‌های همبستگی رسوب - جریان (با استفاده از معادلات تجربی بدست آمدند).

۴- مقاطع عرضی رودخانه (برداشت صحرائی)

۵- پروفیل طولی و پلان رودخانه (برداشت صحرائی)

کلیه اطلاعات مذکور برای تهیه فایل ورودی مدل مورد استفاده قرار

- در رودخانه به منظور افزایش دقت پیش بینی و همچنین کارایی مدل.
- ۲- توسعه مدل برای جریان فوق بحرانی برای شرایطی که جریان در رودخانه به حالت فوق بحرانی می‌رسد.
- ۳- کاربرد معادلات تنشهای اصطکاکی ناشی از اصطکاک سطح جریان با هوا و آشفستگی جریان در بستر رودخانه
- ۴- توسعه مدل برای آنالیز جریانهای غیر ماندگار (هیدروگراف سیل)
- ۵- افزایش توان تشابه سازی مدل با توجه به ورود کامپیوترهای با سرعت بالا و حافظه بالاتر
- ۶- تهیه یک مدل سه بعدی بر اساس تجارب و نتایج بدست آمده از این مدل
- ۷- کاربرد مدل فوق در تعدادی از رودخانه‌های کشور که با مشکل فرسایش کناری مواجه‌اند و کالیبراسیون مدل در شرایط مختلف

## مراجع

- 1 - Anderson, D. A., Tannehill, J. C. and Pletcher, R. H. (1984). *Computational fluid mechanics and heat transfer*. HPC Publication, PP. 600.
  - 2 - Bush, A. W., Lewis, B. A. and Warren, M. D. (1989). *Flow modeling in industrial processes*. Ellis Horwood Limited, PP. 258.
  - 3 - Johanneson, H. and Parker, G. (1989). "Velocity redistribution in meandering rivers." *Journal of Hyd. Eng.*, Vol. 115, No. 8, ASCE, PP. 1019-1039.
  - 4 - Livesley, R. K. (1989). *Mathematical methods for engineers*. Ellis Horwood Limited. PP. 462.
  - 5 - Odgaard, A. J. (1989). "River meandering model I: Development & II: Applications." *Journal of Hyd. Eng.*, Vol. 115, No. 11, ASCE, PP. 1433-1464.
  - 6 - Smith, J. D. and Mclean, S. R. (1984). "A model for flow in meandering streams." *Journal of Water Resource Research*, Vol. 20, No. 9, PP. 1301-1315.
  - 7 - Shixma, W. (1986). "Scouring in down stream of dams and gates." *East China Technical University of Water Resources*, Nanjing, China.
- movable-bed models for river problems: A state-of-the-art*. Delft hydraulics publication, No. 441, PP. 35-47.

## واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- 1 - Backward & Forward
- 2 - Stream Power
- 3 - Tranverse slope