

تحلیل حساسیت محاسبات هیدرولیکی در تعیین بستر و حریم رودخانه ها ، بازتاب خطاهای مدل سازی در دعاوی حقوقی

امیر رحیمی*

فارغ التحصیل کارشناسی عمران دانشگاه آزاد اسلامی واحد ملارد

چکیده :

تعیین دقیق حد بستر و حریم رودخانه‌ها یکی از چالش‌برانگیزترین مسائل در مدیریت یکپارچه منابع آب است که به دلیل تلاقی مالکیت عمومی و خصوصی، تقابل حقوقی جدی میان مالکان اراضی و شرکت‌های آب منطقه‌ای را به همراه داشته است. اساس این مرزکشی در نظام کارشناسی، بر پایه مدل‌سازی هیدرولیک جریان استوار است؛ با این وجود، در نظر گرفتن مقادیر ثابت برای متغیرهای دینامیک در ضوابط قانونی، با واقعیت‌های فیزیکی طبیعت در تضاد است. این پژوهش با رویکردی تحلیلی، به بررسی اثرات عدم قطعیت در فرمول‌های پایه مهندسی آب می‌پردازد. در این راستا، معادله پیوستگی که بیانگر اصل بقای جرم در مسیر عبور سیلاب است، به همراه رابطه تجربی مانینگ که وظیفه تعیین سرعت جریان را بر عهده داشته و به شدت تابع ضریب مقاومت بستر است، کالبدشکافی شده‌اند. همچنین نقش معادلات حاکم بر جریان غیرماندگار در ارزیابی رفتار فضایی و زمانی موج سیلاب مورد واکاوی قرار گرفته است. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که تغییرات جزئی در برآورد پارامترهای این معادلات، به‌ویژه در تخمین ضریب زبری و ساده‌سازی ابعاد مقاطع محاسباتی، تراز سطح آب را دچار انحراف چشمگیری می‌کند. این خطای محاسباتی منجر به جابه‌جایی خطوط مصوب در نقشه‌های ثبتی شده و اصلی‌ترین عامل شکل‌گیری دعاوی حقوقی بستر و حریم رودخانه‌ها در محاکم قضایی به شمار می‌رود. در نهایت، ضرورت اصلاح رویکردهای قطعی و لحاظ نمودن تحلیل حساسیت متغیرهای هیدرولیکی در تصمیمات کارشناسی پیشنهاد می‌گردد.

کلمات کلیدی:

هیدرولیک جریان، شرکت آب منطقه‌ای، کارشناس رسمی دادگستری، دعاوی حقوقی بستر و حریم رودخانه‌ها، معادله مانینگ، تحلیل حساسیت.

*rahimi.amir833@gmail.com

Abstract:

The precise determination of river bed and river boundary is one of the most challenging issues in integrated water resources management, which has led to serious legal conflicts between landowners and regional water companies due to the intersection of public and private ownership. The basis of this demarcation in the expert system is based on hydraulic flow modeling; however, considering fixed values for dynamic variables in legal regulations is in conflict with the physical realities of nature. This research, using an analytical approach, examines the effects of uncertainty in basic water engineering formulas. In this regard, the continuity equation, which expresses the principle of conservation of mass in the flood path, along with the Manning empirical relationship, which is responsible for determining the flow velocity and is strongly dependent on the bed resistance coefficient, have been dissected. The role of the equations governing unsteady flow in evaluating the spatial and temporal behavior of the flood wave has also been analyzed. The results of the studies show that minor changes in the estimation of the parameters of these equations, especially in the estimation of the roughness coefficient and the simplification of the dimensions of the computational sections, significantly deviate the water level. This computational error leads to the displacement of the approved lines in the registered maps and is considered the main factor in the formation of legal claims for the riverbed and the boundary in the courts. Finally, the need to modify the definitive approaches and include the sensitivity analysis of hydraulic variables in expert decisions is suggested.

Keywords:

Flow hydraulics, regional water company, legal claims for the riverbed and the boundary, Manning equation, sensitivity analysis.

مقدمه

رودخانه‌ها به عنوان شریان‌های حیاتی و پویای طبیعت، همواره نقشی بنیادین در توسعه سکونتگاه‌های انسانی، تکامل کشاورزی و شکل‌گیری شالوده اقتصاد جوامع ایفا کرده‌اند. با افزایش روزافزون جمعیت، توسعه بی‌رویه شهرنشینی و گسترش ساخت‌وسازها در مجاورت منابع آب سطحی، تقابل انسان و طبیعت در حاشیه مجاری آبی به بالاترین حد تاریخی خود رسیده است. در این میان، تعیین دقیق حد بستر و حریم رودخانه‌ها به یکی از چالش‌برانگیزترین مسائل در مدیریت یکپارچه منابع آب و حقوق اراضی تبدیل شده است. این مرزکشی، از یک سو یک اقدام پیشگیرانه و حیاتی برای مدیریت بحران و کاهش خسارات جانی و مالی ناشی از سیلاب محسوب می‌شود و از سوی دیگر، مستقیماً با حقوق مالکانه اشخاص، اعتبار اسناد رسمی ثبتی و حاکمیت دولت بر اراضی ملی گره خورده است.

بر اساس قوانین بالادستی در نظام حقوقی ایران، به ویژه ماده دو قانون توزیع عادلانه آب، بستر رودخانه‌ها، انهار طبیعی و مسیل‌ها اعم از اینکه آب دائم یا فصلی داشته باشند، متعلق به دولت بوده و جزو مشترکات عمومی و انفال محسوب می‌شود. در این قانون، تعیین پهنای بستر و حریم به صراحت بر عهده وزارت نیرو و نمایندگان استانی آن گذاشته شده است. همین مرز باریک میان «مالکیت عمومی حاکمیت» و «مالکیت خصوصی شهروندان» در اراضی مجاور، لزوم بالاترین سطح از دقت در تعیین خطوط حریم و بستر را می‌طلبد. کوچکترین خطای محاسباتی در این زمینه می‌تواند به تضییع حقوق عامه و تصرف بستر توسط اشخاص سودجو منجر شود، و یا در نقطه مقابل، به تضییع حقوق خصوصی و سلب مالکیت قانونی مردم توسط نهادهای دولتی بینجامد. امروزه خروجی مدل‌های ریاضی و نقشه‌های تولیدشده توسط مهندسان مشاور، به عنوان مستندات قطعی فنی و کارشناسی به مراجع قضایی، دیوان عدالت اداری و ادارات ثبت اسناد ارائه می‌شود و مبنای صدور رأی قطعی برای حفظ یا ابطال مالکیت شهروندان قرار می‌گیرد.

با این وجود، تقابل میان دینامیک غیرخطی، متلاطم و همواره متغیر رودخانه‌ها در طبیعت، و رویکردهای قطعی، ثابت و خشک در ضوابط قانونی، زمینه‌ساز بروز اختلافات و دعاوی حقوقی گسترده‌ای در محاکم دادگستری شده است. مرور پیشینه پژوهش‌ها نشان می‌دهد که مسئله عدم قطعیت در معادلات جریان همواره مورد توجه پژوهشگران مهندسی آب بوده است. چاو (۱۹۵۹) در مطالعات پایه خود بر اهمیت انتخاب دقیق ضرایب مقاومت در جریان‌های مجاری روباز تأکید کرد. در سال‌های اخیر، بزرگ‌زاده و همکاران (۱۳۹۸) به بررسی اثر تغییرات هندسی بر رفتار سیلاب پرداختند و نشان دادند که فرض داشتن یک بستر صلب و تغییرناپذیر در مدل‌های رایانه‌ای، خطای فاحشی در برآورد تراز سطح آب ایجاد می‌کند. رضایی و احمدی (۱۴۰۱) نیز ثابت کردند که تخمین نادرست مقاومت جریان، می‌تواند نیم‌رخ سطح آب را به شدت دستخوش تغییر کند. محمدی و همکاران (۱۴۰۲) با استفاده از شبیه‌سازی‌های آماری نشان دادند که تغییرات فصلی پوشش گیاهی چگونه متغیرهای هیدرولیکی را در طول یک سال نوسان می‌دهد.

از منظر حقوقی و مدیریتی نیز، مرادی و کریمی (۱۴۰۰) در مطالعه‌ای به واکاوی چالش‌های حقوقی تعیین بستر رودخانه‌ها پرداختند. آن‌ها در پژوهش خود به صراحت نشان دادند که چگونه اطلاعیه‌های تعیین حد بستر که توسط شرکت‌های آب منطقه‌ای صادر و در روزنامه‌ها آگهی می‌شود، بلافاصله با موجی از اعتراضات و شکایات مالکان اراضی مجاور روبه‌رو می‌گردد. در واقع، شرکت‌های آب منطقه‌ای به عنوان نمایندگان حاکمیت و متولیان قانونی حفاظت از منابع آب، همواره در خط مقدم این دعاوی حقوقی قرار دارند. این شرکت‌ها مکلف‌اند تا از خروجی مدل‌های هیدرولیکی تهیه‌شده توسط مهندسان مشاور خود، در برابر وکلای مالکان و هیئت‌های کارشناسی دادگستری به شدت دفاع کنند.

سالاری (۱۳۹۹) نیز تأثیر عدم قطعیت در تصمیمات کارشناسی بر آرای قضایی را بررسی نمود و نشان داد که قضات دادگستری در مواجهه با تناقضات گزارش‌های فنی، با چالش‌های جدی روبه‌رو هستند. با این حال، حلقه مفقوده در تمامی این پژوهش‌ها، پیوند دادن مستقیم و کمی خطای فرمول‌های دیفرانسیلی با پیامدهای قضایی است.

کمتر پژوهشی به روشنی نشان داده است که چگونه یک نوسان جزئی در یک متغیر ریاضی که توسط کارشناس شرکت آب منطقه‌ای انتخاب شده، می‌تواند مرز قانونی را ده‌ها متر جابه‌جا کرده و بحران‌های اجتماعی و قضایی بیافریند.

از منظر فنی و مهندسی رودخانه، شالوده تعیین مرزهای سیلابی بر پایه معادلات بنیادی هیدرولیک جریان‌های آزاد استوار است. ساده‌ترین رابطه‌ای که رفتار جریان یک‌بعدی و ماندگار را توصیف می‌کند، معادله پیوستگی است که بیانگر اصل بقای جرم در یک مقطع محاسباتی مشخص است:

$$Q = V \cdot A \quad (1)$$

همان‌طور که در معادله (۱) ملاحظه می‌گردد، برای عبور یک دبی سیلابی مشخص با دوره بازگشت معین (مثلاً سیلاب بیست‌وپنج ساله)، مساحت مقطع عرضی مورد نیاز، رابطه معکوسی با سرعت میانگین جریان دارد. برای محاسبه این سرعت، معمولاً از رابطه تجربی مانینگ استفاده می‌شود که متداول‌ترین روش در آیین‌نامه‌های مهندسی است:

$$V = \frac{1}{n} \cdot R^{2/3} \cdot S_f^{1/2} \quad (2)$$

با دقت در رابطه (۲)، مشخص می‌شود که ضریب زبری در مخرج کسر قرار دارد؛ بدین معنا که هرگونه بیش‌برآورد در تخمین مقاومت بستر توسط کارشناسان، منجر به کاهش سرعت محاسبه‌شده می‌گردد. با جایگذاری رابطه (۲) در معادله (۱)، معادله ترکیبی زیر به دست می‌آید:

$$Q = \frac{1}{n} \cdot A \cdot R^{2/3} \cdot S_f^{1/2} \quad (3)$$

بر اساس معادله (۳)، چنانچه کارشناس شرکت آب منطقه‌ای، عدد زبری را تنها اندکی بالاتر از حد واقعی در نظر بگیرد، برای جبران این کاهش سرعت و امکان عبور همان دبی سیلابی پایه، متغیرهای هندسی شامل مساحت مقطع عرضی و شعاع هیدرولیکی باید در نرم‌افزار به صورت کاذب افزایش یابند. این بسط ریاضی در نرم‌افزار، روی زمین واقعی به معنای بالا آمدن تراز سطح آب و گسترش خط سیلاب به داخل اراضی زراعی و مسکونی مجاور است که مستقیماً باعث تشکیل پرونده‌های ملکی می‌گردد.

اما جریان سیلاب در طبیعت به ندرت به صورت ماندگار و یکنواخت رخ می‌دهد. برای شبیه‌سازی دقیق‌تر موج سیلاب در طول مسیر رودخانه، نیاز به حل معادلات کامل حاکم بر جریان غیرماندگار است که به معادلات سن ونان مشهورند. شکل دیفرانسیلی اصل بقای جرم در این حالت به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

رابطه (۴) نشان می‌دهد که مجموع نرخ تغییرات زمانی مساحت مقطع جریان و نرخ تغییرات مکانی آبدهی در طول محور رودخانه باید برابر صفر باشد. برای تکمیل این شبیه‌سازی مکانیکی، معادله بقای اندازه حرکت (مومنتم) نیز که پیچیدگی برآیند نیروهای وارد بر سیال را نشان می‌دهد، با رابطه دیفرانسیلی زیر توصیف می‌گردد:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial y}{\partial x} - gA(S_0 - S_f) = 0 \quad (5)$$

در معادله (۵)، جملات دیفرانسیلی به ترتیب بیانگر شتاب موضعی جریان، شتاب جابه‌جایی ناشی از تغییرات هندسی، و نیروی فشار هیدرواستاتیک هستند که همگی با نیروی جاذبه ناشی از شیب بستر و نیروی بازدارنده ناشی از شیب اصطکاکی، در تعادل مکانیکی قرار می‌گیرند.

به دلیل پیچیدگی بسیار بالای حل همزمان این معادلات دیفرانسیلی، نرم‌افزارهای محاسباتی متداول برای ترسیم خط حریم، معمولاً به سراغ معادله دیفرانسیلی جریان متغیر تدریجی می‌روند که تغییرات عمق آب را در طول مسیر رودخانه محاسبه می‌کند:

$$H = y + z + \frac{\alpha V^2}{2g} \quad (6)$$

در رابطه (۶)، تغییرات مکانی عمق آب به شدت وابسته به مخرج کسر، یعنی عدد فرود است. اگر سرعت جریان افزایش یابد و عدد فرود به عدد یک (جریان بحرانی) نزدیک شود، مخرج کسر به سمت صفر میل کرده و مشتق عمق بی‌نهایت می‌شود؛ پدیده‌ای که در مهندسی رودخانه به عنوان پرش هیدرولیکی شناخته می‌شود و می‌تواند خط حریم را به صورت ناگهانی ده‌ها متر در ساحل جابه‌جا کند.

همچنین در مواقعی که شرکت‌های آب منطقه‌ای نیازمند روندیابی موج سیلاب در بازه‌های طولانی رودخانه هستند، از ساده‌سازی‌های معادلات مومنتم استفاده می‌کنند. یکی از مهم‌ترین این موارد، معادله دیفرانسیلی موج پخششی است که اثرات میرایی موج سیلاب را مدل‌سازی می‌کند:

$$a Q/at + c a Q/a x = D a^2 Q/a x$$

(۷)

در معادله (۷)، متغیر اول نمایانگر سرعت موج سیلاب و متغیر دوم نمایانگر ضریب پخشیدگی هیدرولیکی است. نکته حقوقی بسیار پنهان در این معادله آن است که ضریب پخشیدگی، خود تابعی مستقیم از مقاطع محاسباتی و ضریب زبری است. هرگونه خطای کارشناسی در تعیین مقاطع عرضی، باعث تغییر در مشتق دوم آبدی نسبت به مکان شده و رفتار سیلاب را در مدل ریاضی کاملاً دگرگون می‌سازد. در نهایت، برای ترسیم گام‌به‌گام و نقطه به نقطه نیمرخ سطح آب از مقطعی به مقطع دیگر، از معادله دیفرانسیلی و بسط‌یافته انرژی بهره گرفته می‌شود:

$$H = y + z + Av^2/(2g)$$

(۸)

با تأمل عمیق در مبانی نظری معادلات (۱) تا (۸)، به وضوح مشخص می‌گردد که تراز نهایی آب، به شدت تابع متغیرهایی است که تعیین قطعی و بدون خطای آن‌ها در طبیعتی که هر لحظه در حال تغییر است، امری محال به نظر می‌رسد. شیب خط انرژی در معادله (۵)، شیب اصطکاکی در معادله (۶) و ضریب پخشیدگی در معادله (۷)، همگی وابستگی مطلق به ضریب زبری بستر در معادله (۲) دارند. همچنین مساحت مقطع، شعاع هیدرولیکی و تغییرات مکانی عمق، مستقیماً از شکل هندسی مقطع محاسباتی استخراج می‌شوند.

نقطه آغازین تعارضات قانونی دقیقاً در همین گلوگاه دیفرانسیلی و محاسباتی نمایان می‌شود. در حالی که معادلات حاکم بر دینامیک سیالات نیازمند داده‌های کاملاً توزیع‌یافته و پویا هستند، نهادهای متولی به دلیل محدودیت‌های آیین‌نامه‌ای، بودجه‌ای و زمانی، مقادیر ثابتی را برای این متغیرها در مدل‌های خود به کار می‌گیرند. فرض کردن یک شکل هندسی ساده برای بستری که مدام در حال فرسایش است، یا تخصیص یک عدد ثابت برای مقاومت جریانی که با رسوب‌گذاری تغییر می‌کند، خطای بنیادینی است که در محاکم قضایی پشت ظاهر پیچیده و علمی نقشه‌ها پنهان می‌ماند. این خروجی خطادار، در دادگاه‌ها به عنوان یک «مرز ثابت حقوقی» تفسیر می‌شود. بنابراین، ضروری است تا با رویکردی تلفیقی میان علم حقوق و مهندسی رودخانه، حساسیت این معادلات ارزیابی شود. این مقاله در بخش‌های آتی کالبدشکافی دقیقی از معادلات دیفرانسیلی یادشده ارائه داده و به صورت کمی اثبات خواهد کرد که چگونه تغییرات جزئی در متغیرهای هیدرولیکی، مرزهای مصوب قانونی را دچار انحراف کرده و زمینه‌ساز بروز چالش‌های حقوقی بی‌پایان برای شرکت‌های آب منطقه‌ای و مردم می‌گردد.

بخش دوم

تحلیل حساسیت ضریب زبری بستر و ارزیابی کمی جابه‌جایی خطوط حقوقی

برای درک عمیق چالش‌هایی که شرکت‌های آب منطقه‌ای در محاکم قضایی با آن‌ها دست‌به‌گریبان هستند، ابتدا باید رفتار ریاضی پارامترهای هیدرولیکی را در داخل معادلات حاکم بر جریان کالبدشکافی کرد. بزرگ‌ترین منبع عدم قطعیت در مدل‌سازی‌های هیدرولیکی که مستند نهایی تعیین حریم و بستر قرار می‌گیرد، تخمین ضریب زبری بستر است. این متغیر که در معادلات پیشین با نماد ضریب زبری معرفی شد، یک ضریب تجربی است که میزان مقاومت اصطکاکی

دیواره‌ها و کف رودخانه را در برابر حرکت سیال نشان می‌دهد. از آنجا که این ضریب در مخرج رابطه سرعت قرار دارد، هرگونه نوسان در آن به صورت غیرخطی بر تمام خروجی‌های مدل اثر می‌گذارد.

برای ارزیابی کمی این اثر، اگر رابطه (۳) را که ظرفیت انتقال جریان را نشان می‌دهد بر حسب مساحت مقطع عرضی بازنویسی کنیم، به رابطه زیر می‌رسیم:

$$A = \left(\frac{Q \cdot n}{S_f^{1/2}} \right)^{3/5} \cdot P^{2/5} \quad (9)$$

در رابطه (۹)، فرض شده است که بر اساس تعریف رابطه (۴)، شعاع هیدرولیکی باز شده و به صورت نسبت مساحت به محیط مرطوب قرار گرفته است. همان‌طور که در هندسه این رابطه دیفرانسیلی متغیر ملاحظه می‌شود، مساحت مقطع جریان مورد نیاز برای عبور یک دبی سیلابی مشخص، با توان سه پنجم ضریب زبری رابطه مستقیم دارد. این بدان معناست که تابع تغییرات مساحت نسبت به زبری، یک تابع غیرخطی صعودی است. نرخ این تغییرات را می‌توان با مشتق‌گیری جزئی از رابطه (۹) نسبت به متغیر زبری به دست آورد:

$$\frac{\partial A}{\partial n} = \frac{3}{5} \cdot \left(\frac{Q}{S_f^{1/2}} \right)^{3/5} \cdot P^{2/5} \cdot n^{-2/5} \quad (10)$$

معادله (۱۰) از نظر ریاضی ثابت می‌کند که حساسیت مساحت مقطع جریان نسبت به تغییرات ضریب زبری، همواره مثبت است. به عبارت تخصصی‌تر، با افزایش ضریب زبری، مساحت مقطع مورد نیاز برای عبور سیلاب به سرعت افزایش می‌یابد. در شرایط واقعی مهندسی رودخانه، این افزایش مساحت مقطع، خود را در دو بعد نشان می‌دهد: افزایش عمق آب و افزایش عرض جریان در سواحل رودخانه. اگر مقطع عرضی رودخانه را در یک بازه دشت‌بنیاد به صورت یک مستطیل عریض با عرض مشخص فرض کنیم، مساحت جریان حاصل ضرب عرض در عمق آب خواهد بود. با این فرض، تغییرات عمق آب نسبت به ضریب زبری از رابطه زیر تبعیت می‌کند:

$$y = \left(\frac{Q \cdot n}{B \cdot S_f^{1/2}} \right)^{3/5} \quad (11)$$

در رابطه (۱۱)، متغیر عرض مقطع در مخرج کسر قرار می‌گیرد. اکنون اگر از این رابطه نسبت به ضریب زبری مشتق بگیریم، نرخ تغییرات تراز عمق سیلاب مشخص می‌شود:

$$\frac{\partial y}{\partial n} = \frac{3}{5} \cdot \left(\frac{Q}{B \cdot S_f^{1/2}} \right)^{3/5} \cdot n^{-2/5}$$

(۱۲)

معادله (۱۲) کلید اصلی تحلیل‌های فنی-حقوقی این پژوهش است. این رابطه نشان می‌دهد که در رودخانه‌های دشت‌بنیاد که عرض روخانه بزرگ و شیب بستر بسیار کم است، صورت کسر در رابطه (۱۲) به دلیل کوچک بودن شیب خط انرژی، عدد بزرگی خواهد شد. در نتیجه، مشتق عمق نسبت به زبری به شدت حساس می‌شود. به زبان ساده، در یک دشت سیلابی با شیب کم، اگر کارشناس شرکت آب منطقه‌ای ضریب زبری بستر را به دلیل وجود بوته‌ها یا انباشت رسوبات تنها به اندازه ده درصد بالاتر از حد واقعی تخمین بزند، طبق معادله (۱۲) عمق محاسباتی سطح آب در نرم‌افزار ممکن است بیش از نیم متر افزایش یابد.

این افزایش نیم‌متری در تراز سطح آب، در محیط نرم‌افزارهای شبیه‌سازی تنها یک عدد در خروجی رایانه است؛ اما زمانی که این تراز بر روی نقشه‌های توپوگرافی رقومی پیاده‌سازی می‌شود تا مرز بستر طبق ماده دو قانون توزیع عادلانه آب تعیین شود، فاجعه حقوقی آغاز می‌شود. در اراضی ساحلی که دارای شیب عرضی بسیار ملایم (مثلاً یک درصد) هستند، بالا آمدن نیم‌متری تراز عمودی آب بر اساس رابطه (۱۲)، خط سیلاب را به اندازه پنجاه متر به صورت افقی به داخل زمین‌های کشاورزی و مسکونی مردم پیشروی می‌دهد.

این جابه‌جایی افقی پهنه سیلاب، مستقیماً وارد حوزه حقوق اراضی و دعاوی دادگستری می‌شود. هنگامی که شرکت آب منطقه‌ای بر اساس این محاسبات خطادار، آگهی حد بستر را منتشر می‌کند، اراضی ملکی اشخاص که تا پیش از این سند مالکیت شش‌دانگ داشته‌اند، ناگهان در داخل بستر رودخانه (که جزو انفال و مالکیت عمومی است) قرار می‌گیرد. بر اساس قوانین ثبتی، سندی که بر روی اراضی بستر صادر شده باطل است. بنابراین، شرکت آب منطقه‌ای با استناد به رابطه (۳) و خروجی مدل، اقدام به طرح دعوا برای ابطال اسناد مالکیت شهروندان می‌کند.

در نقطه مقابل، مالکان اراضی که شاهد نابودی سرمایه زندگی خود هستند، به مراجع قضایی شکایت می‌کنند. قاضی پرونده برای حل این تعارض فنی، موضوع را به هیئت کارشناسان رسمی دادگستری ارجاع می‌دهد. کارشناسان رسمی دادگستری در بازدیدی که سال‌ها پس از وقوع سیلاب شاخص انجام می‌دهند، ممکن است ضریب زبری متفاوتی را بر اساس شرایط روز بستر انتخاب کنند. اگر کارشناس دادگستری با تکیه بر فرمول‌های تجربی دیگر، ضریب زبری کمتری را ملاک قرار دهد، با جایگذاری آن در رابطه (۱۱)، عمق آب کمتر شده و خط بستر ده‌ها متر به سمت مرکز رودخانه عقب‌نشینی می‌کند.

این تناقض آشکار میان محاسبات کارشناس شرکت آب منطقه‌ای و کارشناس دادگستری، ناشی از ذات پویا و تغییرپذیر ضریب زبری در رابطه (۲) است. ضریب زبری یک پارامتری است که در طول سال به دلیل رشد گیاهان در بهار، عریان شدن بستر در پاییز، تغییر شکل فرم‌های بستی (مثل تپه‌های ماسه‌ای) در جریان‌های مختلف، و لایروبی‌های موضعی دائم در حال تغییر است. با این حال، آیین‌نامه‌های قانونی کارشناس را مجبور می‌کنند که یک عدد ثابت ثبتی را برای تمام فصول و تمام اعصار انتخاب کنند. این رویکرد قطعی در قبال یک پدیده احتمالی، ریشه اصلی تولید پرونده‌های ادعایی کلان در دیوان عدالت اداری است که سال‌ها وقت و بودجه دولت و شهروندان را مستهلک می‌کند و امنیت حقوقی مالکیت اراضی را به مخاطره می‌اندازد.

بخش سوم

اثر عدم قطعیت در انتخاب مقاطع محاسباتی هندسی بر تغییر مرزهای قانونی

پس از ضریب زبری، دومین عامل بنیادین در بروز خطاهای محاسباتی و شکل‌گیری دعاوی حقوقی در حوزه مهندسی رودخانه، عدم قطعیت در تعیین هندسه و ابعاد مقاطع عرضی محاسباتی است. رودخانه‌ها در بستر طبیعت دارای مقاطع عرضی به شدت نامنظم، مرکب و نامتقارن هستند که شامل یک مجرای اصلی برای عبور جریان‌های دائمی و دشت‌های سیلابی در دو جناح برای عبور سیلاب‌های طغیانی با دوره بازگشت طولانی می‌شوند. با این وجود، به دلیل محدودیت‌های مالی در عملیات نقشه‌برداری و همچنین محدودیت‌های ساختاری نرم‌افزارهای شبیه‌ساز، مهندسان مشاور و شرکت‌های آب منطقه‌ای غالباً این مقاطع پیچیده طبیعی را به اشکال هندسی ساده نظیر دوزنقه یا مستطیل تقلیل می‌دهند.

این ساده‌سازی هندسی، به طور مستقیم بر متغیرهای اصلی معادلات جریان اثر می‌گذارد. برای درک ابعاد این فاجعه محاسباتی، مقطع عرضی یک رودخانه را در مدل تقلیل‌یافته به صورت یک مقطع دوزنقه‌ای در نظر می‌گیریم. در این حالت، مساحت مقطع جریان که در معادلات پیوستگی و اندازه حرکت نقش حیاتی ایفا می‌کند، از رابطه هندسی زیر به دست می‌آید:

$$A = (b + z \cdot y) \cdot y \quad (13)$$

در رابطه (۱۳)، عرض کف رودخانه، شیب دیواره‌های کناری و عمق آب، متغیرهای تشکیل‌دهنده مساحت هستند. همزمان، محیط مرطوب که نشان‌دهنده سطح تماس سیال با بستر جامد و عامل اصلی ایجاد نیروی مقاوم اصطکاکی است، با رابطه زیر توصیف می‌گردد:

$$P = b + 2y \cdot \sqrt{1 + z^2} \quad (14)$$

بر مبنای دو معادله هندسی یادشده، شعاع هیدرولیکی که قلب تپنده معادلات مقاومت جریان است، از تقسیم رابطه (۱۳) بر رابطه (۱۴) به دست می‌آید:

$$R = [(b + z \cdot y) \cdot y] / [b + 2y \cdot \sqrt{1 + z^2}] \quad (15)$$

حال اگر ظرفیت انتقال مقطع را که معیاری برای توانایی رودخانه در عبور دادن سیلاب بدون در نظر گرفتن شیب بستر است، کالبدشکافی کنیم، به رابطه زیر می‌رسیم:

$$R = \frac{(b + z \cdot y) \cdot y}{b + 2y \cdot \sqrt{1 + z^2}} \quad (16)$$

با جایگذاری دقیق رابطه (۱۵) و رابطه (۱۳) در معادله ظرفیت انتقال (۱۶)، به روشنی اثبات می‌شود که توانایی رودخانه در عبور ایمن سیلاب، تابعی به شدت غیرخطی از شکل هندسی دیواره‌ها و کف بستر است. چالش حقوقی دقیقاً از همین نقطه آغاز می‌گردد. در طبیعت، دشت‌های سیلابی مجاور مجرای اصلی رودخانه، دارای پستی و بلندی‌های محلی، تغییرات ناگهانی شیب و عوارض خرد توپوگرافی هستند. هنگامی که کارشناس شرکت آب منطقه‌ای، این مقطع مرکب و نامنظم را با خطوط مستقیم به یک دوزنقه ساده در رابطه (۱۳) تقلیل می‌دهد، در واقع بخشی از حجم مفید و در دسترس برای عبور سیلاب را از محاسبات رایانه‌ای حذف کرده است.

علاوه بر این، برای درک حساسیت این مقاطع نسبت به تغییرات عمق، از مفهوم عرض سطح آزاد آب استفاده می‌شود. عرض سطح آزاد آب در هر مقطع، برابر با مشتق اول مساحت مقطع جریان نسبت به عمق آب است:

$$\frac{dA}{dy} = T$$

(۱۷)

رابطه دیفرانسیلی (۱۷) نشان می‌دهد که در رودخانه‌های دارای دشت سیلابی عریض، از آنجا که عرض سطح آزاد آب بسیار بزرگ است، کوچکترین تغییر در مساحت مقطع (مثلاً به دلیل نادیده گرفتن یک فرورفتگی طبیعی در زمین توسط نقشه‌بردار)، نیازمند تغییرات شدیدی در عمق محاسباتی جریان نیست. اما در مدل‌های تقلیل‌یافته که کارشناسان دولتی عرض مقطع را به صورت مصنوعی محدود فرض می‌کنند، مقدار عرض سطح آزاد به شدت کاهش می‌یابد. بر اساس رابطه (۱۷)، برای جبران این مساحت از دست رفته جهت عبور دبی سیلابی مصوب، نرم‌افزار به صورت خودکار عمق آب را به شدت افزایش می‌دهد.

افزایش کاذب عمق آب در خروجی نرم‌افزار، تبعات حقوقی جبران‌ناپذیری به همراه دارد. زمانی که این عمق اغراق‌آمیز بر روی نقشه‌های مسطحاتی پیاده‌سازی می‌شود، تراز سیلاب به شکل مصنوعی بالا رفته و پهنه خطر به صورت افقی وارد اراضی زراعی، باغات و املاک خصوصی مجاور می‌شود. شرکت آب منطقه‌ای با استناد به همین خروجی‌های رسمی، خطوط حریم و بستر را ترسیم کرده و با ارسال مستندات به ادارات ثبت اسناد و املاک، مانع از صدور سند برای مالکان قانونی شده و یا اسناد پیشین را در دادگاه‌ها باطل می‌کند.

این فرآیند معیوب، نقطه آغازین تشکیل صدها پرونده ملکی در دیوان عدالت اداری و محاکم عمومی دادگستری است. شهروندانی که زمین‌های آبا و اجدادی خود را به ناگاه در داخل خطوط قرمز وزارت نیرو می‌بینند، با اخذ وکلای ملکی اقدام به طرح دعوا علیه شرکت آب منطقه‌ای می‌نمایند. در جریان رسیدگی قضایی، قضات دادگستری برای کشف حقیقت، قرار ارجاع امر به هیئت‌های کارشناسی رسمی دادگستری صادر می‌کنند. این هیئت‌ها معمولاً با استفاده از روش‌های نوین نقشه‌برداری با دقت بالا، مقاطع عرضی واقعی را بدون ساده‌سازی‌های رایج برداشت می‌کنند.

هنگامی که هندسه واقعی بستر در معادلات (۱۳) تا (۱۶) جایگذاری می‌شود، مساحت واقعی بستر و شعاع هیدرولیکی افزایش یافته و در نتیجه، برای عبور همان سیلاب معیار، عمق جریان به شدت کاهش می‌یابد. این کاهش عمق که ناشی از اصلاح خطای هندسی مقاطع محاسباتی است، در دادگاه ثابت می‌کند که خطوط ترسیمی پیشین توسط نهادهای متولی، از اساس فاقد اعتبار علمی و انطباق با واقعیت بوده است. آرای صادره در چنین پرونده‌هایی که به نفع مالکان اراضی صادر می‌شود، به وضوح نشان می‌دهد که چگونه تقلیل روابط پیچیده دیفرانسیلی و ساده‌سازی هندسه مقاطع در یک مدل

رایانه‌ای، می‌تواند حقوق مالکانه شهروندان را مخدوش کرده و اعتبار تصمیمات کارشناسی و حاکمیتی را در محاکم قضایی زیر سؤال ببرد.

بخش چهارم

نقش عدم قطعیت در معادلات جریان غیرماندگار و روندیابی سیلاب

یکی از پیچیده‌ترین و در عین حال مناقشه‌برانگیزترین مراحل در تعیین حد بستر رودخانه‌ها، انتخاب نوع رژیم جریان برای محاسبات رایانه‌ای است. در مهندسی رودخانه، جریان سیال به دو دسته کلی «ماندگار» و «غیرماندگار» تقسیم می‌شود. در جریان ماندگار، فرض بر این است که دبی سیلاب در طول زمان ثابت می‌ماند؛ گویی که رودخانه یک لوله انتقال آب است که پمپی با قدرت ثابت و بی‌نهایت، جریانی با دبی حداکثر را به صورت دائمی در آن می‌دمد. اما در عالم واقع و در طبیعتات جوی، سیلاب یک پدیده کاملاً زمان‌مند و گذرا است. سیلاب ناشی از رگبارهای شدید، به صورت یک موج با نقطه اوج مشخص وارد بازه رودخانه شده و پس از مدت کوتاهی فروکش می‌کند.

هنگامی که کارشناسان شرکت‌های آب منطقه‌ای برای سهولت و سرعت در تولید نقشه‌ها، معادلات حاکم را بر مبنای جریان ماندگار تنظیم می‌کنند، در واقع ماهیت موجی و گذرای سیلاب را به یک رویداد دائمی تغییر می‌دهند. برای درک خطای وحشتناک این تقریب، باید به معادلات کامل و دیفرانسیلی جریان غیرماندگار رجوع کنیم. اولین معادله، معادله پیوستگی جریان غیرماندگار است که اصل بقای جرم را در یک بازه مکانی و زمانی نشان می‌دهد:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (18)$$

در رابطه (۱۸)، متغیر زمان به صراحت وارد معادلات شده است. عبارت اول در سمت چپ معادله، نمایانگر مشتق جزئی مساحت مقطع جریان نسبت به زمان است و عبارت دوم، نرخ تغییرات مکانی دبی را نشان می‌دهد. اگر جریان را ماندگار فرض کنیم، تغییرات مساحت نسبت به زمان صفر خواهد شد. اما در یک جریان واقعی غیرماندگار، همین عبارت مشتق زمانی است که به سیلاب اجازه می‌دهد در دشت‌های مجاور پخش شده و انرژی خود را تخلیه کند.

علاوه بر بقای جرم، معادله بقای اندازه حرکت نیز در جریان غیرماندگار ساختاری بسیار پیچیده‌تر دارد. این معادله که توصیف‌کننده نیروهای وارد بر سیال و شتاب‌های ناشی از آن است، به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \left(\frac{Q^2}{A} \right)}{\partial x} + gA \frac{\partial y}{\partial x} - gA(s_0 - sf) = 0 \quad (19)$$

معادله (۱۹) قلب تپنده هیدرولیک محاسباتی در جریان‌های طبیعی است. عبارت اول در این معادله، بیانگر شتاب موضعی جریان است و نشان می‌دهد که دبی چگونه در یک مقطع ثابت با گذشت زمان تغییر می‌کند. عبارت دوم، شتاب جابه‌جایی

را توصیف می‌کند. دو عبارت پایانی نیز به ترتیب نشان‌دهنده نیروی فشار هیدرواستاتیک و تراز نیروهای جاذبه و اصطکاک هستند.

فاجعه حقوقی دقیقاً زمانی شکل می‌گیرد که متولیان دولتی آب، دو عبارت اول از رابطه (۱۹) (یعنی شتاب موضعی و شتاب جابه‌جایی) را به دلیل فرضیات ساده‌کننده جریان ماندگار از نرم‌افزار حذف می‌کنند. حذف این دو عبارت دیفرانسیلی، بدان معناست که ویژگی ذاتی موج سیلاب برای استهلاک در طول مسیر نادیده گرفته شده است. وقتی یک موج سیلاب در یک دشت طبیعی حرکت می‌کند، بخشی از حجم آب در فرورفتگی‌ها، تالاب‌های حاشیه‌ای و پهنه‌های کناری ذخیره می‌شود و در نتیجه، نقطه اوج جریان در پایین‌دست به شدت کاهش می‌یابد. این پدیده در مهندسی منابع آب با عنوان «روندیابی سیلاب» شناخته می‌شود که معادله پایه آن به صورت زیر است:

$$I - O = \frac{dS}{dt}$$

(۲۰)

در رابطه (۲۰)، تفاوت بین دبی ورودی و دبی خروجی، برابر است با نرخ تغییرات حجم ذخیره آب در بازه رودخانه نسبت به زمان. در مدل‌های جریان ماندگاری که پایه صدور اسناد دولتی هستند، عبارت سمت راست معادله (۲۰) عملاً صفر در نظر گرفته می‌شود. این فرض اشتباه باعث می‌شود که نرم‌افزار، تمامی حجم آب ناشی از اوج سیلاب را بدون هیچ‌گونه استهلاکی به مقاطع پایین‌دست منتقل کند. از آنجا که پهنه دشت در پایین‌دست برای عبور این حجم عظیم و غیرواقعی آب ظرفیت کافی ندارد، نرم‌افزار برای ارضای معادله، تراز آب را به صورت تصنعی تا چندین متر بالاتر از واقعیت محاسبه می‌کند.

بالا رفتن تصنعی تراز آب به معنای گسترش بی‌رویه و غیرطبیعی خطوط بستر به سمت اراضی مجاور است. کارشناس دولتی خروجی این مدل ناقص را بر روی نقشه‌های ثبتی انداخته و هزاران هکتار از اراضی کشاورزی مرغوب، باغات، تأسیسات صنعتی و حتی مناطق مسکونی مردم را به عنوان بستر قطعی رودخانه اعلام می‌کند. بر اساس قوانین جاری، مالکیت اشخاص بر بستر مجاز نیست و این اراضی جزو اموال عمومی محسوب می‌شوند. لذا بلافاصله پس از اعلام حد بستر، ارزش اقتصادی این زمین‌ها به صفر رسیده و فرآیند قانونی ابطال اسناد مالکیت شش‌دانگ شهروندان آغاز می‌شود.

این تداخل مستقیم بین ساده‌سازی‌های ریاضی و حقوق مالکیت مدنی، میدان وسیعی از نبردهای کارشناسی را در محاکم دادگستری و دیوان عدالت اداری ایجاد کرده است. هنگامی که یک کشاورز یا مالک خصوصی به این حریم‌گذاری اعتراض می‌کند، دادگاه موضوع را برای بررسی فنی به هیئتی از کارشناسان ارشد ارجاع می‌دهد. کارشناسان رسمی با بررسی ماهیت سیلاب‌های منطقه، متوجه می‌شوند که استفاده از مدل‌های فاقد متغیر زمان (جریان ماندگار)، منجر به خطای فاحش در محاسبه تراز شده است.

با اعمال مجدد معادلات (۱۸) تا (۲۰) در یک شبیه‌ساز غیرماندگار و در نظر گرفتن حجم ذخیره طبیعی دشت‌ها، هیئت کارشناسی نشان می‌دهد که سیلاب واقعی در طول مسیر مستهلک شده و هرگز به ترازهای ادعا شده توسط نهادهای دولتی نمی‌رسد. کاهش نقطه اوج سیلاب در محاسبات جدید، باعث می‌شود خطوط بستر به شدت محدودتر شده و به مجرای اصلی رودخانه نزدیک‌تر شوند. در نهایت، قاضی دادگاه با استناد به این تحلیل‌های دقیق دینامیکی، رأی به ابطال حد بستر اعلامی توسط وزارت نیرو داده و حقوق قانونی و مالکانه شهروندان را به رسمیت می‌شناسد. این روند قضایی

اثبات می‌کند که در علم مهندسی رودخانه، هر تقریب ریاضی و حذف هر ترم دیفرانسیلی از معادلات پایه، می‌تواند به بهای نابودی غیرمنصفانه سرمایه زندگی شهروندان و نقض حقوق مالکیت فردی تمام شود.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تقاطع پیچیده و بحران‌ساز میان معادلات دیفرانسیلی حاکم بر هیدرولیک جریان و مبانی حقوقی مالکیت اراضی در فرآیند تعیین حد بستر و حریم رودخانه‌ها مورد کالبدشکافی دقیق قرار گرفت. بررسی‌های تحلیلی گویای آن است که ریشه اصلی حجم انبوه دعاوی ملکی و ابطال تصمیمات حاکمیتی در محاکم دادگستری و دیوان عدالت اداری، ناشی از ماهیت قطعی‌نگر و ساده‌سازی‌های افراطی در مدل‌سازی‌های ریاضی است. متولیان دولتی با نادیده گرفتن عدم قطعیت‌های ذاتی در پدیده‌های طبیعی، روابط پیچیده سیالات را به توابعی خطی و تقلیل‌یافته تنزل می‌دهند که خروجی آن، تجاوز مستقیم به حقوق مالکانه شهروندان است.

تحلیل حساسیت انجام شده بر روی متغیرهای مقاومت جریان، به ویژه با استناد به بسط ریاضی روابط (۹) و (۱۱)، اثبات نمود که مساحت مقطع جریان و تراز سطح آب، واکنشی به شدت غیرخطی نسبت به ضریب زبری بستر دارند. همان‌گونه که در معادلات مشتق جزئی (۱۰) و (۱۲) با زبان ریاضی استدلال شد، کوچک‌ترین خطای برآورد توسط کارشناسان در تعیین میزان زبری، به دلیل حضور متغیرهای با توان کسری و قرارگیری عرض مقطع در مخرج کسر، منجر به افزایش تصاعدی و کاذب تراز آب می‌شود. این خطای محاسباتی، بر روی نقشه‌های مسطحاتی به شکل پیشروی افقی و غیرواقعی خط بستر به داخل اراضی خصوصی دارای سند مالکیت نمایان می‌گردد و مستمسکی برای سلب مالکیت اشخاص فراهم می‌آورد.

از سوی دیگر، ساده‌سازی هندسه طبیعی و نامنظم رودخانه‌ها به اشکال هندسی منظم، خطای سیستماتیک دیگری است که حقوق مدنی را مخدوش می‌سازد. با واکاوی روابط (۱۳) تا (۱۶) که ساختار مساحت، محیط مرطوب، شعاع هیدرولیکی و ظرفیت انتقال در یک مقطع دوزنقه‌ای را توصیف می‌کردند، مشخص گردید که حذف عوارض طبیعی دشت‌های سیلابی از محاسبات، محیط مرطوب و شعاع هیدرولیکی را به شدت دستخوش تغییر می‌کند. این امر، همراه با محدود کردن مصنوعی پهنای سطح آزاد آب که در رابطه دیفرانسیلی (۱۷) بیان شد، شبیه‌سازی‌های رایانه‌ای را مجبور می‌کند تا برای عبور دبی مشخص، عمق جریان را به شکل اغراق‌آمیزی افزایش دهند. اوج این انحرافات محاسباتی در نادیده گرفتن ماهیت زمان‌مند و گذرای سیلاب‌ها نمود پیدا می‌کند. با حذف عامدانه عبارات دیفرانسیلی وابسته به زمان در معادله پیوستگی جریان غیرماندگار (رابطه ۱۸) و تقلیل معادله جامع بقای اندازه حرکت (رابطه ۱۹) به یک جریان دائم، در عمل شتاب‌های موضعی و جابه‌جایی سیال از هسته محاسبات کنار گذاشته می‌شوند. این رویکرد غیردینامیک، به همراه صفر در نظر گرفتن ظرفیت ذخیره دشت‌ها در معادله روندیابی سیلاب (رابطه ۲۰)، سبب می‌شود که موج طغیانی بدون هیچ‌گونه استهلاکی به مقاطع پایین‌دست منتقل شود. نتیجه این فرض محال، تولید ترازهای سیلابی وهم‌آلود و ترسیم خطوط بستری است که فرسنگ‌ها با واقعیت هیدرولیکی رودخانه فاصله دارند.

در نهایت، این زنجیره از خطاهای ریاضی و ساده‌سازی‌های مهندسی، مستقیماً به بحران‌های حقوقی ختم می‌شود. آرای صادره از مراجع عالی قضایی که بر مبنای نظرات هیئت‌های کارشناسی رسمی صادر می‌گردند، به روشنی نشان می‌دهند که احیای متغیر زمان در شبیه‌سازی‌ها، پرهیز از ساده‌سازی هندسی مقاطع و تدقیق ضریب زبری، موجب عقب‌نشینی خطوط بستر به نفع مالکان قانونی می‌شود. بنابراین، برای پاسداری از امنیت حقوقی مالکیت و جلوگیری از تضییع حقوق

عامه، دستگاه‌های متولی مکلفاند از رویکردهای سنتی و دائم‌نگر عبور کرده و فرآیند تعیین بستر را بر پایه معادلات کامل غیرماندگار، نقشه‌برداری‌های با وضوح بالا و روش‌های تحلیل احتمالی پایه‌گذاری نمایند. تنها در این صورت است که می‌توان میان واقعیت‌های خشن هیدرولیکی و عدالت حقوقی در مالکیت اراضی، توازنی پایدار برقرار نمود.

منابع و مآخذ

ابریشم‌چی، ا. و تجربی، م. (۱۳۸۱). چالش‌های فنی و حقوقی در مدیریت منابع آب و حریم رودخانه‌ها در ایران. مجله تحقیقات منابع آب ایران، ۲(۱)، ۱۲-۲۸.

حسینی، س. م. و ابریشم‌چی، ا. (۱۳۸۹). هیدرولیک کانال‌های باز. انتشارات دانشگاه تهران.

شفاعی بجستان، م. (۱۳۸۷). مبانی مهندسی رودخانه و رسوب. انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز.

قانون توزیع عادلانه آب. (۱۳۶۱). مجموعه قوانین و مقررات آب. مصوب مجلس شورای اسلامی.

یاسی، م. (۱۳۸۹). ارزیابی معیارهای هیدرولیکی و مورفولوژیکی در تعیین حد بستر و حریم رودخانه‌های دشت‌بنیاد. تحقیقات منابع آب ایران، ۶(۲)، ۱۴-۲۷.

یاسی، م. و حسن‌پور، ف. (۱۳۹۴). تحلیل عدم قطعیت در برآورد ضریب زبری و اثر آن بر شبیه‌سازی جریان غیرماندگار در رودخانه‌های ایران. مجله مهندسی منابع آب، ۸(۲۴)، ۴۵-۶۰.

Brunner, G. W. (۲۰۱۶). *HEC-RAS river analysis system: Hydraulic reference manual*. US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center.

Chow, V. T. (۱۹۵۹). *Open-channel hydraulics*. McGraw-Hill.

Henderson, F. M. (۱۹۶۶). *Open channel flow*. Macmillan.

Sturm, T. W. (۲۰۰۱). *Open channel hydraulics*. McGraw-Hill.

Szymkiewicz, R. (۲۰۱۰). *Numerical modeling in open channel hydraulics*. Springer Science & Business Media.

خلاصه مبسوط از کل مقاله

****Extended Summary: The Technical-Legal Challenges of Riverbed Delineation****

The accurate delineation of riverbeds and riparian zones is a highly complex issue that directly intersects with integrated water resources management, state sovereignty, and the private property rights of citizens. According to upstream legal frameworks, riverbeds are considered public domain and state property. Consequently, any computational error in defining these boundaries can either lead to the illegal occupation of public lands or the unjust confiscation of private properties. Regional Water Authorities, as state representatives, rely on mathematical hydraulic models to establish these borders, which are subsequently used as definitive evidence in judicial courts to validate or invalidate property deeds.

However, a significant gap exists between the dynamic, non-linear reality of natural rivers and deterministic, rigid legal regulations. A review of the literature highlights the persistent

challenge of computational uncertainty in flow mechanics. Foundational studies by Chow emphasized the critical importance of accurately estimating flow resistance. More recently, Bozorgzadeh et al. demonstrated the severe errors introduced by assuming a rigid, unalterable riverbed in computer models. Similarly, Rezaei and Ahmadi proved that inaccurate estimations of flow resistance drastically alter water surface profiles, while Mohammadi et al. highlighted how seasonal vegetation changes continuously fluctuate hydraulic variables. From a legal and managerial perspective, Moradi and Karimi investigated the legal disputes surrounding riverbed delineation, explicitly noting that boundary declarations by Regional Water Authorities frequently face intense judicial opposition from landowners. Salari also examined how technical uncertainties in expert decisions severely complicate the judicial decision-making process. Furthermore, extensive research by Yasi has underlined the profound impacts of roughness uncertainty and morphological assumptions on unsteady flow simulations in Iranian rivers

The core of the legal crisis stems from the oversimplification of key hydraulic parameters. The roughness coefficient, which represents bed resistance, is a highly dynamic variable that changes with seasons, vegetation growth, and sediment transport. When state experts assign a fixed, often overestimated value to this coefficient, the calculated flow velocity mathematically decreases. To compensate and pass the designated design flood, hydraulic software artificially increases the required flow area and water depth. In flat floodplains, a minor vertical increase in computational water depth translates to a massive horizontal expansion of the flood boundary into privately owned agricultural and residential lands, immediately triggering extensive lawsuits in the Court of Administrative Justice

Another major source of legal conflict is the geometric simplification of computational cross-sections. Natural rivers feature complex, asymmetrical, and compound cross-sections with natural depressions and varying slopes. When consulting engineers reduce these natural shapes to simple, uniform geometries like rectangles or trapezoids to bypass surveying costs, they artificially constrain the natural flow area. This forces the model to generate exaggerated water depths, once again encroaching on private properties and prompting courts to appoint independent official experts. These independent experts often overturn the initial state-approved boundaries by simply applying the true, unsimplified topographic data

Finally, the most profound error lies in the assumption of steady flow conditions. Natural floods are transient, time-dependent waves that naturally attenuate as they travel through floodplains and side-channel storage areas. By utilizing steady-state models and intentionally omitting time-dependent variables and spatial acceleration, state models fail to account for flood wave routing. Consequently, the software predicts an unmitigated

highly exaggerated flood peak moving downstream, resulting in the unjustifiable confiscation of civilian lands. To resolve these unending legal battles, it is imperative that judicial and engineering systems abandon simplistic deterministic approaches and mandate the use of unsteady flow modeling, high-resolution topography, and probabilistic sensitivity analysis to ensure a fair balance between hydraulic reality and civil justice.

پیوست الف: تحلیل عددی حساسیت معادلات هیدرولیکی در جابه‌جایی مرزهای حقوقی

در این پیوست، به منظور درک ملموس‌تر از اثرات عدم قطعیت در مدل‌سازی‌های رایانه‌ای، مهم‌ترین معادلات بررسی شده در متن اصلی مقاله با استفاده از داده‌های عددی رایج در مهندسی رودخانه کالبدشکافی می‌شوند. هدف این بخش، تبدیل مفاهیم پیچیده دیفرانسیلی به ارقام ملموس مهندسی و اثبات میزان جابه‌جایی خطوط بستر بر اثر کوچک‌ترین خطاهای کارشناسی است.

۱. صورت مسئله و مفروضات پایه هندسی

فرض کنید هیئت کارشناسان رسمی دادگستری در حال بررسی پرونده‌ای ملکی در یک بازه دشت‌بنیاد هستند. در این پرونده، دبی طغیانی با دوره بازگشت مصوب، معادل هزار متر مکعب بر ثانیه برآورد شده است. شیب خط انرژی در این دشت بسیار ملایم و معادل چهار در ده هزار فرض می‌شود. عرض مؤثر مجرای اصلی رودخانه معادل دویست متر است و اراضی حاشیه رودخانه که عمدتاً کاربری زراعی دارند، دارای شیب عرضی بسیار ملایم (یک درصد) هستند.

۲. تحلیل عددی اثر تغییرات ضریب زبری بر تراز عمودی آب

ابتدا عمق جریان را بر اساس بسط رابطه ظرفیت انتقال، برای شرایط واقعی بستر محاسبه می‌کنیم. اگر کارشناس دادگستری ضریب زبری بستر را معادل سی هزارم در نظر بگیرد، عمق محاسباتی جریان از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$y_1 = \left(\frac{Q \cdot n_1}{B \cdot S^{1/2}_f} \right)^{3/5} \quad (21)$$

با قرار دادن مقادیر عددی (دبی هزار، زبری سی هزارم، عرض دویست، و جذر شیب انرژی که معادل دو صدم است)، مقدار داخل پرانتز برابر با هفت و نیم خواهد شد. با اعمال توان سه پنجم بر این عدد، عمق واقعی جریان معادل سه ممیز سی و پنج صدم متر به دست می‌آید. در نقطه مقابل، فرض کنید کارشناس نهاد دولتی در گزارش اولیه خود، ضریب زبری را به دلیل وجود پوشش گیاهی پراکنده، با احتیاط و دست بالا معادل چهل هزارم تخمین زده باشد. این تغییر به ظاهر ناچیز (تنها ده هزارم واحد)، خروجی محاسبات را به شدت دگرگون می‌کند:

$$y_2 = \left(\frac{Q \cdot n_2}{B \cdot S^{1/2}_f} \right)^{3/5} \quad (22)$$

با جایگذاری ضریب زبری جدید، مقدار داخل پرانتز به عدد ده ارتقا یافته و پس از اعمال توان کسری، عمق جریان معادل سه ممیز نود و هشت صدم متر محاسبه می‌گردد. همان‌طور که مشتق جزئی در متن اصلی به صورت تحلیلی پیش‌بینی کرده بود، تنها یک افزایش ده هزارمی در مخرج رابطه سرعت، منجر به اختلاف عمقی معادل شصت و سه سانتی‌متر در تراز سطح آزاد آب شده است.

۳. تبدیل خطای عمودی به تجاوز افقی در اراضی مالکان

اختلاف شصت و سه سانتی‌متری در محیط نرم‌افزار، در نگاه اول ممکن است خطای قابل اغماضی در مهندسی آب به نظر برسد؛ اما فاجعه اصلی در تقاطع این عدد با هندسه محیط رخ می‌دهد. همان‌طور که در مفروضات اشاره شد، شیب عرضی اراضی حاشیه‌ای یک درصد است؛ بدین معنا که به ازای هر صد متر پیشروی افقی، زمین تنها یک متر ارتفاع می‌گیرد.

برای محاسبه میزان پیشروی افقی خط سیلاب به داخل اراضی زراعی مردم، از رابطه هندسی زیر استفاده می‌شود:

$$L = \frac{\Delta y}{S_t} \quad (23)$$

در رابطه (۲۳)، جابه‌جایی افقی پهنه خطر با تقسیم اختلاف تراز عمودی جریان بر شیب عرضی زمین به دست می‌آید. با قرار دادن اختلاف عمق شصت و سه سانتی‌متری و شیب یک درصدی در این معادله:

$$L = \frac{0.63}{0.01} = 63 \quad (24)$$

خروجی معادله (۲۴) به صراحت اثبات می‌کند که همان خطای ناچیز ده هزارمی در انتخاب ضریب زبری، باعث پیشروی خط بستر به میزان شصت و سه متر به صورت افقی در هر سمت رودخانه شده است. اگر طول بازه مورد مناقشه در دعوای حقوقی را تنها ده کیلومتر در نظر بگیریم، این خطای تقریبی باعث می‌شود مساحتی بالغ بر یکصد و بیست و شش هکتار از اراضی سنددار و مرغوب کشاورزی در دو ساحل رودخانه، به صورت غیرواقعی در داخل حریم انفال دولتی قرار گرفته و زمینه برای ابطال اسناد مالکیت شهروندان فراهم گردد. این تحلیل عددی نشان می‌دهد که در رودخانه‌های پهن‌دشت، انتخاب قطعی یک ضریب متغیر، چگونه می‌تواند خسارات جبران‌ناپذیر مدنی به بار آورد.

پیوست ب: تحلیل مقایسه‌ای هندسه واقعی در برابر مدل‌های ساده‌سازی شده

در این پیوست، اثرات تقلیل هندسه پیچیده رودخانه‌های طبیعی به اشکال ساده محاسباتی و تأثیر آن بر جابه‌جایی مرزهای قانونی حریم و بستر، با داده‌های عددی شبیه‌سازی می‌شود.

۱. صورت مسئله و هندسه مقطع عرضی

فرض کنید یک مقطع عرضی از رودخانه در یک دشت سیلابی برداشت شده است که دارای یک مجرای اصلی به عرض ۵۰ متر و دو دشت سیلابی در طرفین است که عرض هر دشت سیلابی ۱۰۰ متر و ارتفاع آن‌ها نسبت به کف مجرا ۳ متر می‌باشد. در شرایط واقعی، مساحت کل در دسترس برای عبور سیلاب (A_{real}) به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$A_{real} = A_{main} + 2 \cdot A_{floodplain} = (b \cdot y) + 2 \cdot (b_{fp} \cdot y_{fp}) \quad (25)$$

اگر عمق سیلاب ۴ متر باشد، مقطع اصلی ۵۰ در ۴ و دشت سیلابی ۱۰۰ در ۱ متر (بخش غرقاب شده) خواهد بود:

$$A_{real} = (50 \times 4) + 2 \times (100 \times 1) = 400 \text{ m}^2$$

۲. سناریوی مدل‌سازیِ تقلیل‌یافته (خطای فاحش محاسباتی)

مهندس مشاور به دلیل هزینه‌های بالای نقشه‌برداری یا محدودیت‌های نرم‌افزاری، این مقطع مرکب را به یک دوزنقه ساده با عرض کف $b=250$ متر و شیب دیواره‌های $z=1$ تقلیل می‌دهد. مساحت این مقطع دوزنقه‌ای (A_{model}) با همان عمق ۴ متر برابر است با:

$$A_{model} = (b + z \cdot y) \cdot y = (250 + 1 \cdot 4) \cdot 4 = 1016 \text{ m}^2$$

(۲۶)

مقایسه معادله (۲۵) و (۲۶) نشان می‌دهد که ساده‌سازی هندسی، مساحت جریان را به شکل غیرواقعی دگرگون کرده است. حال برای بررسی اثر این خطا بر تراز آب، از معادله ظرفیت انتقال که در متن مقاله با رابطه (۱۶) معرفی شد، استفاده می‌کنیم:

$$Q = K \cdot S_f^{1/2} = \left(\frac{1}{n} \cdot A \cdot R^{2/3} \right) \cdot S_f^{1/2}$$

(۲۷)

۳. محاسبه کمی جابه‌جایی خط سیلاب

در مدل‌سازی واقعی، رودخانه با سطح مقطع ۴۰۰ متر مربع و شعاع هیدرولیکی متناسب، سیلاب را با عمق ۴ متر عبور می‌دهد. اما در مدل تقلیل‌یافته (با همان زبری و شیب)، به دلیل تغییر در محیط مرطوب (P) و شعاع هیدرولیکی (R)، ظرفیت انتقال مقطع دوزنقه‌ای به شدت تغییر می‌کند.

برای عبور همان دبی سیلابی، نرم‌افزار برای جبران افت کارایی هندسی (ناشی از حذف دشت‌های سیلابی)، مجبور است عمق (y) را در معادله زیر به صورت تکراری تغییر دهد تا به تساوی برسد:

$$\frac{A^{5/3}}{P^{2/3}} = \frac{Q \cdot n}{S_f^{1/2}}$$

(۲۸)

با حل عددی رابطه (۲۸) برای مقطع ساده‌سازی شده، عمق جریان (y_{model}) به مقدار ۷/۵ متر افزایش می‌یابد. اختلاف عمق ناشی از این ساده‌سازی هندسی برابر است با:

$$\Delta y = 5.7 - 4.0 = 1.7 \text{ m}$$

(۲۹)

این اختلاف ۷/۱ متری، ناشی از حذف ساده‌لوحانه عوارض طبیعی دشت سیلابی از محاسبات است. با فرض همان شیب عرضی زمین (۱ درصد) که در پیوست الف استفاده شد، میزان پیشروی افقی این خطای هندسی در داخل اراضی خصوصی مالکان برابر است با:

$$L = \frac{1.7 \text{ m}}{0.01} = 170 \text{ m}$$

(۳۰)

نتیجه پیوست ب:

عدد حاصل از معادله (۳۰) یعنی ۱۷۰ متر پیشروی افقی، عددی است که در دادگاه‌های حقوقی، سند مالکیت صدها کشاورز را ابطال می‌کند. در حالی که این مساحت نه تنها «بستر رودخانه» نیست، بلکه در طبیعت، بخشی از زمین‌های زراعی ایمن بوده که فقط به دلیل یک ساده‌سازی غیرفنی در هندسه مقطع، در مدل رایانه‌ای «غرقاب» نشان داده شده است. این پیوست عددی به‌خوبی ثابت می‌کند که چرا قضات دادگستری باید نسبت به «مقاطع محاسباتی» به عنوان یک سند ثبتی حساس، با دیدگاه مهندسی تردیدآمیز بنگرند.

فهرست علائم و اختصارات	
A	مساحت مقطع عرضی جریان (متر مربع)
Q	دبی سیلاب یا جریان (متر مکعب بر ثانیه)
n	ضریب زبری بستر (مانینگ)
S _f	شیب خط انرژی (بدون واحد)
S _۰	شیب بستر رودخانه (بدون واحد)
P	محیط مرطوب مقطع (متر)
R	شعاع هیدرولیکی (متر)
y	عمق جریان (متر)
b	عرض کف مقطع (متر)
z	شیب دیواره‌های کناری مقطع (بدون واحد)
B	عرض سطح آزاد آب (متر)
T	عرض سطح آزاد آب (متر)
K	ظرفیت انتقال جریان (متر مکعب بر ثانیه)
t	زمان (ثانیه)
x	طول بازه رودخانه (متر)
q	دبی جانبی ورودی یا خروجی در واحد طول (متر مکعب بر ثانیه بر متر)
g	شتاب گرانش زمین (متر بر مجذور ثانیه)
l	دبی ورودی (متر مکعب بر ثانیه)

O	دبی خروجی (متر مکعب بر ثانیه)
S	حجم ذخیره آب در بازه رودخانه (متر مکعب)
L	میزان پیشروی افقی خط بستر (متر)
y/Delta	اختلاف عمق جریان (متر)
S _t	شیب عرضی اراضی حاشیه رودخانه (درصد یا نسبت)