

تشخیص روابط هندسی - هیدرولیکی سطح مقطع رودخانه‌ها با استفاده از حل معکوس معادلات سنت - ونانت و کاربرد آن

سوده کلامی (دانش‌آموخته کارشناسی ارشد)

مهدی مظاهری* (استادار)

جمال محمدولی سامانی (استاد)

گروه سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس

مهندسی عمران شریف، زمستان ۱۳۹۸ (۳۳-۳۲)
دوری ۲ - ۳۵، شماره ۴/۲، ص. ۳۳-۳۲

پژوهش حاضر، با ارائه‌ی یک مدل ریاضی، روابط هندسی - هیدرولیکی مستخرج از مقاطع عرضی یک رودخانه‌ی طبیعی را با استفاده از حل معکوس معادلات سنت - ونانت و بدون برداشت داده‌های پرهزینه‌ی مقاطع آن شناسایی کرده است. روابط مذکور می‌توانند به‌عنوان ورودی در انواع مدل‌های رودخانه، مانند: روندیابی هیدرولیکی، هیدرولیک رسوب، انتقال آلاینده و غیره، استفاده شوند. داده‌های تراز سطح آب نسبت به زمان، به‌عنوان ورودی به مدل معکوس حاضر هستند. صحت عملکرد مدل ارائه شده با استفاده از دو مثال فرضی و واقعی ارزیابی شده است. در هر دو مثال ذکر شده، پس از شناسایی روابط اخیر و مقایسه با حالت واقعی، روندیابی سیل در رودخانه با استفاده از روابط شناسایی شده انجام و با روش‌های روندیابی هیدرولیکی و هیدرولوژیکی (ماسکینگام) مقایسه شد. نتایج حاصل از ارزیابی انجام شده، توانایی مدل مذکور را در شناسایی روابط هیدرولیکی و به کار بردن آن در انواع مدل‌های شبیه‌سازی رودخانه تأیید می‌کند.

واژگان کلیدی: معادلات سنت - ونانت، مدل معکوس، مساحت سطح مقطع، پیرامون مرطوب، عرض آزاد سطح آب.

۱. مقدمه

است و یا پارامترهایی که امکان اندازه‌گیری مستقیم آن‌ها وجود ندارد، مهم‌ترین کاربرد مسائل معکوس به شمار می‌روند. داده‌های مقاطع عرضی رودخانه از مهم‌ترین داده‌هایی هستند که به‌عنوان ورودی در بیشتر مدل‌های هیدرولیکی، هیدرولیک رسوب، انتقال آلاینده و شبیه‌سازی زیستگاه آبریزان استفاده می‌شوند و نقش اساسی در طراحی، برنامه‌ریزی، مدیریت و سامان‌دهی رودخانه دارند و برداشت آن‌ها به دلیل نیاز به انجام عملیات نقشه‌برداری بسیار سخت، پرهزینه و البته زمان‌بر است. پدیده‌ی همیشگی فرسایش و رسوب‌گذاری در رودخانه و به تبع آن، تغییرات مقاطع عرضی باعث تجدید عملیات نقشه‌برداری می‌شود و هزینه‌ها را دوچندان می‌کند. یک مقطع عرضی رودخانه، شامل مجموعه‌ی نقاط به مختصات x و y است، که x فاصله از ساحل چپ و y تراز ارتفاعی نقاط را نشان می‌دهد. پارامترهای «مساحت مقطع»، «پیرامون مرطوب» و «عرض آزاد سطح آب» از مقاطع عرضی به دست می‌آیند و به‌عنوان ورودی در سایر مدل‌های هیدرولیک رودخانه استفاده می‌شوند. به‌عبارت ساده‌تر، مختصات اخیر، نقاط مقاطع عرضی نیستند که وارد محاسبات مدل‌های هیدرولیکی می‌شوند، بلکه پارامترهای هیدرولیکی مستخرج از مجموعه نقاط مذکور هستند که به‌عنوان ورودی در محاسبات استفاده می‌شوند. پارامترهای هیدرولیکی مستخرج با وجود عمق آب درون مقطع معنی پیدا می‌کنند و با افزایش عمق آب، روابط

مسائل معکوس در سال ۱۶۷۳ میلادی توسط هویگنس^۱ پیشنهاد و سپس پژوهش‌گران زیادی در بسیاری از زمینه‌های علمی از آن‌ها استقبال کرده‌اند.^[۱] بیشتر مسائلی که به این طریق بحث می‌شوند، جزء مسائل بدخیم هستند. در مسائل بدخیم، وجود خطاهای کوچک در داده‌های اندازه‌گیری شده، موجب خطای بزرگی در پاسخ مسئله خواهد شد. از طرف دیگر، مسائل معکوس ممکن است اصلاً جواب نداشته باشند، یا بی‌نهایت جواب داشته باشند یا این‌که به جواب واحدی همگرا نشوند.^[۲] به همین دلیل، حل مسائل معکوس باید از طریق روش‌های عددی پیشرفته و استفاده از الگوریتم‌های قوی بهینه‌سازی انجام شود. در حقیقت، مسئله‌ی معکوس یک فرایند محاسباتی است، که از طریق مجموعه‌ی بی‌انتهای مشاهده‌ای، پارامترهای بیان‌کننده‌ی علت مسئله تعیین می‌شوند. البته به شرط آن‌که فیزیک حاکم بر مسئله کاملاً شناخته شده باشد و یا به عبارت دیگر، معادلات حاکم بر مسئله معلوم باشند، زیرا که روش مذکور بر پایه‌ی معکوس کردن مدل ریاضی حاکم بر پدیده‌ی مورد مطالعه استوار است. شناسایی پارامترهای فیزیکی، که اندازه‌گیری آن‌ها سخت و پرهزینه

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۶/۹/۱، اصلاحیه ۱۳۹۷/۲/۲۳، پذیرش ۱۳۹۷/۲/۳۰

DOI:10.24200/J30.2018.5455.2244

s.kalami@modares.ac.ir
m.mazaheri@modares.ac.ir
samani.j@modares.ac.ir

$$K = \alpha AR^\beta \quad (3)$$

که در آن‌ها، A مساحت مقطع، y عمق آب، K ضریب انتقال و R شعاع هیدرولیکی هستند. همچنین چهار پارامتر B ، β ، α و z مجهولات موردشناسایی هستند. رودخانه‌ی مورد نظر آن‌ها منشوری و با فرض منظم بودن مقطع آن در نظر گرفته شده بود. [۱۷] در سال ۲۰۰۹، عبید^۶ با در نظر گرفتن دو رابطه‌ی توانی برای روابط هیدرولیکی مساحت مقطع و ضریب انتقال (روابط ۴ و ۵)، ضرایب موجود در این روابط را با حل معکوس معادلات سنت - ونانت، در یک رودخانه‌ی منشوری و مرکب به دست آوردند: [۱۸]

$$A = ay^b \quad (4)$$

$$K = cy^d \quad (5)$$

که در آن‌ها، A مساحت مقطع، K ضریب انتقال و y عمق آب هستند. ووت^۷ و همکاران (۲۰۰۹)، نیز پارامترهای میانگین عرض سطح، میانگین شیب کف مجرا، میانگین ضریب زبری مانینگ، میانگین دبی در بالادست و میانگین تراز سطح آب در پایین دست یک رودخانه‌ی منظم و منشوری با سطح مقطع دوزنقه‌یی را به دست آوردند. [۱۹] همچنین در سال ۲۰۱۲، جسیز و سلیر^۸ با هدف شناسایی توپوگرافی کف رودخانه، اقدام به حل معکوس معادلات ناوراستوکس در حالت یک و سه بُعدی کردند و مدل پیشنهادی آن‌ها با در نظر گرفتن جریان دائمی تدوین شده بود. [۲۰] مدل مذکور به داده‌های ورودی زیادی نیاز داشت، که در عمل اندازه‌گیری چنین داده‌هایی بسیار سخت و پرهزینه است. تحقیقات اخیر در زمینه‌ی شناسایی مشخصات هندسی - هیدرولیکی رودخانه، یگانه مطالعات انجام شده به روش حل معکوس هستند، که خلاصه‌ی آن‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. استیواردن^۹ (۲۰۰۵)، نیز با بیان اهمیت موضوع هندسه‌ی مقاطع رودخانه و تأثیر آن در رفتار جریان، روابط هندسی - هیدرولیکی مستخرج از مقاطع رودخانه را به عنوان تابعی از سرعت و دبی با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده‌ی: سرعت، دبی، مقاطع رودخانه و سایر پارامترهای رودخانه محاسبه کردند. [۲۱] رز و همکارانش^{۱۰} (۲۰۰۸)، نیز با روش مشابه پژوهش استیواردن، روابط هیدرولیکی پایین‌دست رودخانه را به دست آوردند. [۲۲] همان‌طور که بیان شد، مطالعات انجام شده در زمینه‌ی شناسایی پارامترهای رودخانه به روش مسئله‌ی معکوس، با فرض منشوری بودن بازه و شکل مقاطع منظم صورت گرفته است، در حالی که یک رودخانه‌ی طبیعی غیرمنشوری است و البته دارای شکل مقاطع عرضی نامنظم است. در مطالعات انجام شده با فرض وجود داده‌های هم تراز سطح آب و هم دبی نسبت به زمان به‌عنوان داده‌های مشاهداتی، تمامی روابط هیدرولیکی مستخرج از مقطع شناسایی نشده‌اند، بلکه به شناسایی پارامترهای محدودی بسنده شده است. پژوهش جسیز و سلیر^{۱۱} (۲۰۱۲)، نیز با فرض دائمی بودن جریان، به داده‌های مشاهداتی نیاز دارد، که اندازه‌گیری آن‌ها سخت و پرهزینه است. [۲۳] لذا پژوهش حاضر با ارائه‌ی یک مدل ریاضی مبنی بر حل معکوس معادلات سنت - ونانت، تمامی روابط هیدرولیکی مساحت مقطع، پیرامون مرطوب و عرض آزاد سطح آب را در یک رودخانه‌ی کاملاً طبیعی با مقاطع نامنظم و غیرمنشوری فقط با وجود داده‌های تراز سطح آب نسبت به زمان به‌عنوان داده‌های مشاهداتی شناسایی کرده است. علاوه بر آن، روندیابی هیدرولیکی جریان در رودخانه با استفاده از روابط هیدرولیکی شناسایی شده حاصل از حل معکوس معادلات سنت - ونانت، در رودخانه انجام و با روندیابی جریان به یک روش هیدرولوژیکی (ماسکینگام) مقایسه شده است.

هیدرولیکی را تشکیل می‌دهند؛ به‌طوری که با افزایش عمق آب روند افزایشی دارند و از یک رابطه‌ی ریاضی پیروی می‌کنند. در حقیقت، یک رابطه‌ی ریاضی می‌تواند گویای روند تغییرات روابط هیدرولیکی ذکر شده باشد. به نظر می‌رسد شناسایی روابط ریاضی اشاره شده با یک روش دیگر و بدون داشتن داده‌های مقطع، می‌تواند حذف تمامی هزینه‌های یاد شده را در پی داشته باشد. یکی از مهم‌ترین موارد استفاده روابط هیدرولیکی مستخرج، روندیابی جریان به روش هیدرولیکی است، که در اغلب اوقات به دلیل فقدان داده‌های پرهزینه‌ی مقاطع عرضی رودخانه، به روش‌های غیردقیق هیدرولوژیکی انجام می‌شود. شناسایی روابط هیدرولیکی اشاره شده بدون برداشت داده‌های مقطع و با استفاده از مدل‌سازی معکوس، می‌تواند مشکل روندیابی جریان به روش هیدرولیکی را نیز حل کند. حل معکوس معادلات سنت - ونانت به هدف اخذ ضریب زبری مانینگ و شرط مرزی بالادست تا به حال توسط پژوهشگران زیادی انجام و پژوهش‌های بسیار زیادی در این زمینه ثبت شده است. اما در زمینه‌ی به دست آوردن پارامترهای فیزیکی و پارامترهای معرف خصوصیات رودخانه، مطالعات اندکی وجود دارد. داتا و همکاران^۲ (۲۰۰۰)، حل معکوس معادلات سنت - ونانت را به هدف تخمین ضریب زبری مانینگ، با استفاده از مدل بهینه‌سازی SQP^۳ انجام داده‌اند. [۲] علاوه بر این، در زمینه‌ی تشخیص ضریب زبری مانینگ می‌توان به برخی مطالعات اشاره کرد، که در آن‌ها ضریب زبری مانینگ در یک بازه از رودخانه تا یک شبکه‌ی پیچیده از آن با استفاده از حل معکوس معادلات سنت - ونانت به دست آورده شده است. [۲-۸] در بین مطالعات انجام شده در زمینه‌ی شناسایی شرط مرزی بالادست رودخانه با استفاده از حل معکوس معادلات سنت - ونانت، می‌توان به پژوهش عبدالوحد و کادهم^۴ (۲۰۱۳) اشاره کرد. آن‌ها روندیابی معکوس سیلاب را به وسیله‌ی حل معکوس معادلات سنت - ونانت به دو روش هیدرولیکی و هیدرولوژیکی، انجام و آن‌ها را مقایسه و ارزیابی کردند. [۹] همچنین در این زمینه مطالعات دیگری نیز وجود دارد، که در آن‌ها پژوهشگران با در نظر گرفتن شرایط متفاوت برای رودخانه و به کار بردن روش‌های مختلف حل معکوس، شرط مرزی بالادست را به دست آوردند. [۱۰-۱۴] محاسبه‌ی شرط مرزی بالادست، اصطلاحاً روندیابی معکوس سیلاب نامیده می‌شود. شناسایی دیگر پارامترها در رودخانه با استفاده از حل معکوس معادلات سنت - ونانت، نخستین بار توسط بکر و یاه^۴ در سال ۱۹۷۲ انجام شد. آن‌ها ضرایب اصطکاک n و r موجود در رابطه‌ی ۱ را در یک بازه از رودخانه با سطح مقطع منظم و منشوری شناسایی کردند.

$$s = v |v| r R^{-n} \quad (1)$$

که در آن، v سرعت جریان، s شیب خط انرژی و R شعاع هیدرولیکی است. [۱۵] آن‌ها در سال ۱۹۷۳ به منظور واقعی‌تر ساختن پژوهش خود، شناسایی پارامترهای مذکور را در دو بازه از رودخانه با شرایط متفاوت از یکدیگر (تفاوت در خصوصیات هندسی دو بازه) انجام دادند. رودخانه‌ی دو بازه‌یی موردشناسایی آن‌ها در پژوهش مذکور نیز منشوری و منظم در نظر گرفته شده بود. [۱۶] در سال ۱۹۸۴ میلون و کامگم^۵ با اظهار این‌که خصوصیات هندسی و هیدرولیکی از مهم‌ترین پارامترهای ورودی به هر مدل شبیه‌سازی رودخانه محسوب می‌شوند و برداشت آن‌ها سخت و پرهزینه است، ضرایب موجود در روابط هیدرولیکی مساحت مقطع رابطه‌ی ۲ و ضریب انتقال رابطه‌ی ۳ را با استفاده از حل معکوس معادلات سنت - ونانت شناسایی کردند.

$$A = y (B + zy) \quad (2)$$

جدول ۱. خلاصه‌ی پژوهش‌های انجام شده در زمینه‌ی شناسایی روابط هندسی هیدرولیکی به روش حل معکوس.

نام نویسنده	روش حل معکوس	روش حل مستقیم	الگوریتم مورد استفاده
جسیز و سایر (۲۰۱۲)	بر مبنای تکرار	اختلاف محدود بر مبنای الگوی صریح	One-Shot
عبیده (۲۰۰۹)	بر مبنای تکرار	چهار نقطه‌ی ضمنی پرایزن	Nelder and Mead Simplex Algorithm
ومیلتون و کامگم (۱۹۸۴)	بر مبنای تکرار	چهار نقطه‌ی ضمنی پرایزن	الگوریتم نیوتن
بکره و یاه (۱۹۷۳)	بر مبنای تکرار	اختلاف محدود بر مبنای الگوی صریح	الگوریتم ضریب تأثیر
بکره و یاه (۱۹۷۲)	بر مبنای تکرار	اختلاف محدود بر مبنای الگوی صریح	الگوریتم ضریب تأثیر

۲. کاربردهای مدل معکوس ارائه شده

همان‌طور که بیان شد، مدل معکوس ارائه شده در پژوهش حاضر، روابط هیدرولیکی مستخرج از داده‌های مقاطع را شناسایی می‌کند و آن‌ها می‌توانند در انواع مدل‌سازی هیدرولیکی، هیدرولیک رسوب، انتقال آلاینده و شبیه‌سازی زیستگاه آبزیان به جای داده‌های مقاطع عرضی رودخانه استفاده شوند. یکی از مهم‌ترین کاربردهای روابط هیدرولیکی شناسایی شده، استفاده‌ی آن‌ها در روندیابی جریان به روش هیدرولیکی است. روندیابی جریان به روش هیدرولیکی به داده‌های مقاطع عرضی رودخانه نیاز دارد، که در بیشتر موارد به دلیل فقدان داده‌های مقاطع، روش‌های روندیابی به روش هیدرولوژیکی به آن‌ها ترجیح داده می‌شوند. با شناسایی روابط هیدرولیکی اخیر، می‌توان روندیابی جریان در رودخانه را با روش هیدرولیکی انجام داد، بدون این‌که داده‌های مقاطع عرضی رودخانه در دسترس باشد. در حقیقت با شناسایی روابط هیدرولیکی مذکور، دیگر نیازی به نقشه‌برداری برای برداشت داده‌های مقاطع که با گذشت زمان تغییر می‌کنند، نخواهد بود و حذف هزینه‌های گزاف نقشه‌برداری را به دنبال خواهد داشت. هر مدل معکوس به مجموعه‌ی از داده‌های مشاهداتی سهل‌الوصول، به‌عنوان ورودی به مدل نیاز دارد. در مدل ارائه شده، داده‌های رقم سطح آب نسبت به زمان در چند ایستگاه مشاهداتی، به‌عنوان ورودی به مدل مورد نیاز است. برداشت این داده‌ها به مراتب بسیار آسان‌تر و البته کم‌هزینه‌تر از نقشه‌برداری برای برداشت داده‌های مقاطع است.

۱.۳. مدل مستقیم حل معادلات جریان در رودخانه‌ها

معادلات حاکم بر جریان‌های غیردائمی در حالت یک‌بعدی، معادلات سنت - ونانت هستند. این معادلات از دو معادله‌ی پیوستگی (رابطه‌ی ۷) و مومنتم (رابطه‌ی ۸) تشکیل شده‌اند.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial z_w}{\partial x} + gAS_f = 0 \quad (8)$$

که در آن‌ها، Q دبی جریان، A سطح مقطع جریان، g شتاب ثقل، y عمق جریان، S_f شیب خط انرژی، t زمان، x فاصله‌ی طولی در جهت جریان و z_w تراز سطح آب است. [۲۴] تدوین مدل مستقیم ملزم به حل معادلات مذکور است. حل معادلات هذلولوی معرفی شده به روش تحلیلی، جز در حالت‌های ساده شده‌ی مسئله، امکان‌پذیر نیست و حل کامل آن‌ها باید به روش عددی صورت گیرد. در حال حاضر، در مدل‌سازی جریان غیرماندگار در کانال‌های باز، اغلب از روش تفاضل محدود استفاده می‌شود. یکی از بهترین روش‌های تفاضل محدود، الگوی ضمنی پرایزن [۲۵] است، که از اوایل دهه‌ی ۱۹۶۰ به طور گسترده استفاده شده است. [۱۰] در پژوهش حاضر، الگوی ضمنی پرایزن برای یک رودخانه‌ی واقعی با هندسه‌ی نامنظم مقاطع، نگارش یافته و مدل مستقیم جریان غیردائمی در حالت یک‌بعدی تدوین شده است.

۲.۳. مدل معکوس حل معادلات جریان در رودخانه‌ها

شکل هندسی مقاطع عرضی در یک رودخانه‌ی طبیعی، نامنظم و در طول بازه کاملاً با هم متفاوت هستند، که این موضوع حل مسئله‌ی موردنظر را سخت‌تر می‌کند. در طی مطالعات گسترده‌ی که بر روی روابط هیدرولیکی مستخرج از مقاطع نامنظم رودخانه انجام شده است، مشخص شده است که با وجود نامنظم بودن شکل مقاطع عرضی، روابط هیدرولیکی مستخرج از آن‌ها، روند تغییرات منظمی دارند. در شکل ۱، نمونه‌ی از یک مقطع عرضی رودخانه‌ی طبیعی به همراه روابط هیدرولیکی مساحت مقطع و پیرامون مرطوب آن ارائه شده است. با توجه به شکل ۱، با افزایش آب درون مقطع، مساحت مقطع و پیرامون مرطوب نیز افزایش می‌یابند و با وجود هندسه‌ی نامنظم مقطع، روند افزایشی روابط هیدرولیکی منظم است و می‌تواند از یک رابطه‌ی ریاضی تبعیت کند. به عبارت دیگر، یک رابطه‌ی ریاضی می‌تواند گویای روند تغییرات روابط هیدرولیکی باشد. با توجه به آزمون‌های متعدد صورت گرفته، در مقاطع نامنظم رودخانه‌های طبیعی، روابط هیدرولیکی مستخرج از آن‌ها، روند افزایشی تقریباً مشابهی دارند و یکی از بهترین روابط ریاضی که می‌تواند گویای این روند افزایشی باشد، یک رابطه‌ی نمایی است. پژوهش حاضر، با فرض نمایی بودن روابط هیدرولیکی مساحت مقطع و پیرامون مرطوب به فرم روابط ۹ و ۱۰ به شناسایی ضرایب به کار رفته در آن‌ها پرداخته است. از آن‌جا که عرض آزاد سطح

۳. مبانی تئوری

در هر پدیده‌ی طبیعی اگر فیزیک حاکم بر پدیده‌ی موردنظر، کاملاً شناخته شده باشد، می‌توان مدل حاکم بر آن را شبیه‌سازی کرد. اگر فیزیک حاکم بر مسئله (G) ، پارامترهای ورودی به مدل (m) و اطلاعات حاصل از این مسئله شبیه‌سازی (d) نامیده شود، می‌توان یک مسئله‌ی شبیه‌سازی را طبق رابطه‌ی ۶ بیان کرد: [۲۴]

$$G(m) = d \quad (6)$$

به طور کلی منظور از حل یک مسئله‌ی معکوس این است که اگر اطلاعات حاصل از شبیه‌سازی در دسترس باشد (d) و فیزیک حاکم بر مسئله (که در پژوهش حاضر معادلات حاکم بر جریان‌های غیردائمی است) به طور کامل شناخته شده باشد (G) ، می‌توان مشخصات ورودی به مدل را به دست آورد. مطالعات نشان داده‌اند در زمینه‌ی حل مسائل معکوس، دو رویکرد کلی وجود دارد: ۱. روش مستقیم حل عددی و ۲. روش‌های بر مبنای تکرار یا بهینه‌سازی. [۲۰] در نوشتار حاضر، از روش دوم به منظور حل مسئله‌ی معکوس موردنظر استفاده شده است، که در آن مدل معکوس از ترکیب دو مدل حل مستقیم معادلات حاکم بر پدیده‌ی مورد مطالعه و یک مدل بهینه‌سازی تشکیل شده است.

مرطوب در نظر گرفته می‌شود و سپس ضرایب موجود در آن‌ها شناسایی می‌شود. هر چه تعداد زیربازه‌های موردشناسایی بیشتر باشد، دقت روابط هیدرولیکی شناسایی شده نیز بیشتر می‌شود. البته با توجه به این‌که هر مدل معکوس به مجموعه‌ی از داده‌های مشاهداتی به‌عنوان ورودی به مدل نیاز دارد، هر چه تعداد بازه‌های مورد شناسایی بیشتر باشد، به داده‌های مشاهداتی نیاز بیشتری است. در حقیقت، تعداد بازه‌های موردشناسایی به دقت موردنظر و البته تعداد ایستگاه‌های مشاهداتی موجود در رودخانه وابسته است.

۳.۳. تشکیل تابع هدف و قیود بهینه‌سازی

در پژوهش حاضر، از روش بهینه‌سازی برنامه‌ریزی درجه دوم غیرخطی متوالی (SQP) به منظور تدوین مدل معکوس استفاده شده است. الگوریتم برنامه‌ریزی درجه دوم متوالی (SQP)، یکی از الگوریتم‌های محبوب و قوی بهینه‌سازی است، که به‌عنوان یک روش تکرارپذیر مناسب و مفید برای حل مسائل بهینه‌سازی غیرخطی شناخته شده است. روش SQP، مسئله‌ی بهینه‌سازی را به زیربخش‌هایی تقسیم می‌کند، که هر کدام یک مسئله‌ی برنامه‌ریزی درجه دوم هستند. برنامه‌ریزی درجه دوم (QP)، روشی برای کمینه‌سازی توابع n متغیره با m محدودیت خطی نامساوی یا مساوی و یا هردو است. الگوریتم روش SQP بدین صورت است که از یک نقطه شروع می‌کند و به وسیله‌ی گرادینان داده‌ها به جواب قابل قبول می‌رسد. الگوریتم SQP نیاز به نقطه‌ی شروع منطقی دارد تا به جواب قابل اطمینان برسد. اگر مسئله هیچ‌گونه محدودیت و شرطی نداشته باشد، روش مذکور به روش نیوتن کاهش پیدا می‌کند. الگوریتم SQP در هر تکرار از تقریب تابع لاگرانژ^{۱۵} که از روش اصلاح شده‌ی نیوتن بهره می‌برد، استفاده می‌کند. سپس از طریق برنامه‌ریزی درجه دوم QP، مسئله را حل می‌کند.^[۱۶] روش SQP برای مسائلی کاربرد دارد که تابع هدف آن‌ها از نوع درجه دوم و توابع قیود آن خطی باشد. مسائل برنامه‌ریزی غیرخطی در حالت کلی به‌صورت رابطه‌ی ۱۲ هستند:

$$\min_x F(x) \quad (12)$$

$$s.t. \quad c(x) \geq 0$$

که در آن، F تابع هدف، x بردار مجهولات و c قید بهینه‌سازی محسوب می‌شود. در روش مذکور، ابتدا تابع هدف با ۳ جمله‌ی اول سری تیلور و توابع قیود با ۲ جمله‌ی اول سری تیلور تقریب زده می‌شوند. سپس لاگرانژین تابع هدف تقریب زده تشکیل می‌شود و با اعمال روش نیوتن و حل متوالی معادلات به دست آمده در تکرارهای مختلف، روش برنامه‌ریزی درجه دوم متوالی (SQP) منجر به پاسخ بهینه خواهد شد. سرعت بالای هم‌گرایی و دست‌یابی به حل دقیق نقاط بهینه، از مزیت‌های روش مذکور است و از مهم‌ترین دلایل انتخاب روش بهینه‌سازی SQP برای حل مسئله‌ی حاضر محسوب می‌شود. فلوجارت حل معکوس معادلات سنت - ونانت در شکل ۲ مشاهده می‌شود.

در هر مسئله‌ی بهینه‌سازی، تابع هدف تمام پارامترهایی را که قرار است تخمین زده شوند، شامل می‌شود و پارامترهای موردشناسایی، ضرایب موجود در روابط هیدرولیکی خواهند بود. با توجه به روابط هیدرولیکی ارائه شده در روابط ۹ الی ۱۱، برای هر زیربازه، ۴ عدد مجهول وجود دارد و در صورتی که پارامتر n ، زیربازه‌ی موردشناسایی باشد، بردار مجهولات به صورت بردار $\{a_1, b_1, c_1, d_1, a_2, b_2, c_2, d_2, \dots, a_n, b_n, c_n, d_n\}$ خواهد بود. اندیس مجهولات، شماره‌ی زیربازه‌ی موردشناسایی را مشخص می‌کند. برای تشکیل تابع

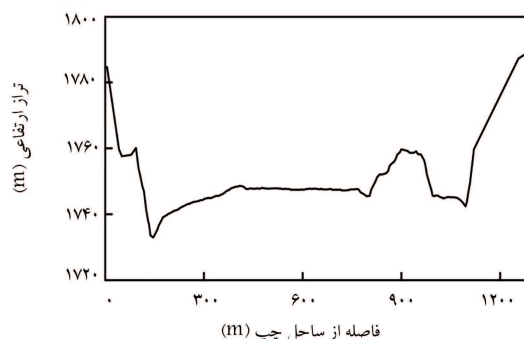
آب، مشتق رابطه‌ی مساحت مقطع است،^[۱۵] لذا نیازی به در نظر گرفتن رابطه‌ی جداگانه برای عرض آزاد سطح آب نخواهد بود و با شناسایی پارامترهای به کار رفته در رابطه‌ی هیدرولیکی مساحت مقطع، رابطه‌ی هیدرولیکی عرض آزاد سطح آب (رابطه‌ی ۱۱) نیز شناسایی می‌شود.

$$A(y) = ae^{by} \quad (9)$$

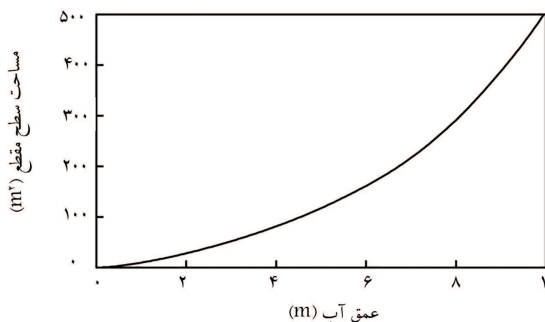
$$P(y) = c(e^{-dy} - 1) \quad (10)$$

$$T(y) = \frac{dA}{dy} = abe^{by} \quad (11)$$

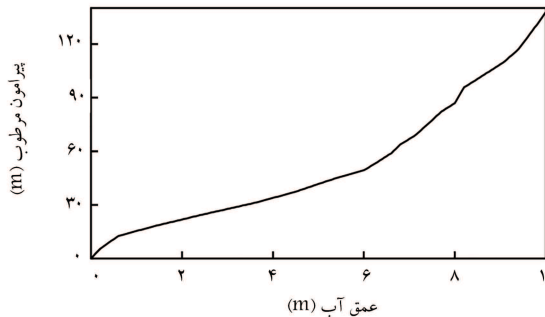
با توجه به نامنظم بودن مقاطع و تغییرات آن‌ها در هر مکان از رودخانه‌ی طبیعی، روابط هیدرولیکی مستخرج از آن‌ها در هر مکان متفاوت است. اما همان‌طور که اشاره شد، همچنان روند آن‌ها از یک رابطه‌ی نمایی پیروی می‌کند. از آن‌جا که نمی‌توان برای هر مکان و یا در حقیقت هر مقطع، رابطه‌ی جداگانه در نظر گرفت (به دلیل زیاد شدن تعداد ضرایب موردشناسایی)، لذا ابتدا بازه‌ی رودخانه به چند زیربازه تقسیم و برای هر زیربازه، یک رابطه‌ی هیدرولیکی مساحت مقطع و پیرامون



الف) نمونه‌ی یک مقطع نامنظم؛

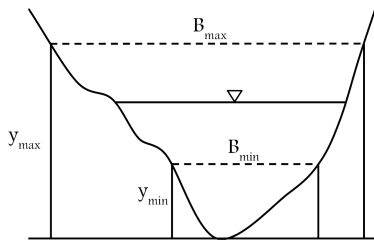


ب) رابطه‌ی هیدرولیکی مساحت سطح مقطع؛

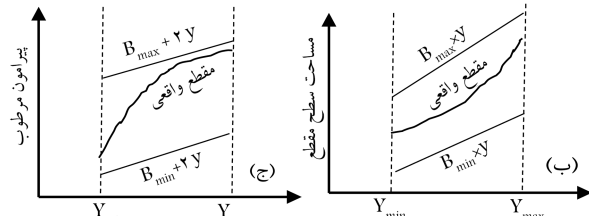


ج) رابطه‌ی هیدرولیکی پیرامون مرطوب.

شکل ۱. روابط هیدرولیکی مستخرج از یک نمونه مقطع نامنظم.



الف) نمونه‌یی از یک مقطع نامنظم؛



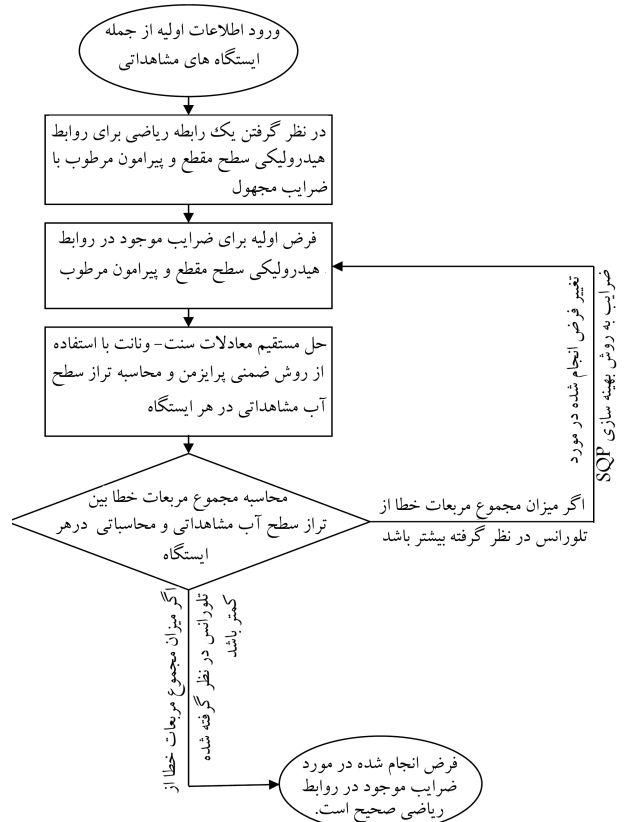
ب) تعیین قید بهینه‌سازی در رابطه‌ی مساحت سطح مقطع؛
ج) تعیین قید بهینه‌سازی در رابطه‌ی هیدرولیکی پیرامون مرطوب.

شکل ۳. نحوه تعیین قیدهای بهینه‌سازی.

مقطع و پیرامون مرطوب در مقطع واقعی بیشتر است. به همین ترتیب با داشتن عرض رودخانه در شرایط کمیته‌ی رقوم سطح آب می‌توان یک مقطع مستطیلی محاط بر مقطع واقعی تشکیل داد، که در هر عمقی مساحت مقطع و پیرامون مرطوب در مقطع مستطیلی از مساحت مقطع و پیرامون مرطوب در مقطع واقعی کمتر است. به این ترتیب حد بالا و پایین مجهولات موردنظر به دست می‌آید و به‌عنوان قید بهینه‌سازی استفاده می‌شود. با توجه به توضیحات اخیر در زمینه‌ی ختم شدن مسائل معکوس به یک مسئله‌ی بدخیم، تعیین حدود مجهولات بسیار مهم است؛ زیرا که با انتخاب محدوده‌های وسیع و بدون قاعده و قانون، مسئله‌ی موردنظر به پاسخ نخواهد رسید و در حقیقت بدخیم خواهد شد. این تذکر لازم است که اندازه‌گیری عرض رودخانه در شرایط مذکور آسان و در دسترس است. عرض رودخانه متناسب با کمیته‌ی رقوم سطح آب، پس از وقوع سیل در هنگامی که جریان در رودخانه به حالت دائمی می‌رسد، به راحتی قابل اندازه‌گیری است. همچنین عرض رودخانه متناسب با بیشینه‌ی رقوم سطح آب، خط داغ آب سیل مذکور است، که این پارامتر نیز به راحتی در دسترس است.

۴. نحوه‌ی صحت‌سنجی مدل معکوس

ارزیابی مدل‌های معکوس با استفاده از یک مثال، که پاسخ آن از قبل معلوم است، انجام می‌شود. در پژوهش حاضر، همانند سایر مطالعات صورت گرفته در زمینه‌ی مدل‌سازی معکوس (همانند: بکر و یاه ۱۹۷۲ و ۱۹۷۳)، دینگ و وانگ (۲۰۰۴)، دوریا و همکاران (۲۰۱۴)، جسیز و سیلیر (۲۰۱۲)، و میلتن و کامگم (۱۹۸۴)، صحت‌سنجی مدل در ابتدا با استفاده از یک مثال فرضی و سپس با یک مثال واقعی انجام شده است. همان‌طور که اشاره شد، مسائل معکوس نسبت به خطای موجود در داده‌های مشاهداتی حساس هستند و با وجود خطا در داده‌ها ممکن است به یک مسئله‌ی بدخیم ختم شوند، لذا صحت‌سنجی مدل معکوس عموماً با اعمال درصدی خطا در داده‌های مشاهداتی انجام می‌شود. در پژوهش حاضر نیز ارزیابی صحت عملکرد مدل ارائه شده، با اعمال ۱۰٪ خطا در داده‌های مشاهداتی



شکل ۲. فلوجارت مدل معکوس ارائه شده.

هدف به داده‌های مشاهداتی نیز نیاز است. داده‌های مشاهداتی می‌توانند داده‌های دبی و یا رقوم سطح آب نسبت به زمان درون رودخانه باشند. به دلیل این که اندازه‌گیری رقوم سطح آب بسیار آسان‌تر از اندازه‌گیری دبی در رودخانه است، داده‌های رقوم سطح آب نسبت به زمان در وسط هر زیربازه‌ی موردشناسایی، به‌عنوان داده‌های مشاهداتی در نظر گرفته شده‌اند. به عبارت ساده‌تر، به ازاء هر زیربازه‌ی موردشناسایی باید یک ایستگاه اندازه‌گیری برداشت رقوم سطح آب وجود داشته باشد. لذا معیار تابع هدف جمع مربعات خطا بین داده‌های رقوم سطح آب مشاهداتی و محاسباتی است، که فرمولاسیون آن به صورت رابطه‌ی ۱۳ است:

$$\text{Minimize } F = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^{N_m} (H_{m,n}^O - H_{m,n}^C)^2 \quad (13)$$

که در آن، H رقوم سطح آب (متر)، M تعداد زیربازه‌های موردشناسایی، N_m تعداد نقاط مشاهداتی برداشت شده در زیربازه‌ی m ام، F معیار مجموع مربعات خطا، O و C نیز به ترتیب معرف مقادیر مشاهداتی و محاسباتی هستند. معیار مجموع مربعات خطا (F)، باید در مرحله‌ی بهینه‌سازی کمیته شود. قید بهینه‌سازی مورد استفاده، حدود ضرایب مجهول انتخاب شده است. برای به دست آوردن قید بهینه‌سازی و یا حد بالا و پایین ضرایب مجهول، به یک مقطع بزرگ‌تر و یک مقطع کوچک‌تر از مقطع واقعی نیاز است، به طوری که هیچ اطلاعاتی نسبت به مقطع واقعی در دسترس نباشد. بدین منظور عرض رودخانه در شرایط بیشینه و کمیته‌ی رقوم سطح آب باید برداشت شود. مطابق شکل ۳، با داشتن عرض رودخانه در شرایط بیشینه‌ی رقوم سطح آب می‌توان یک مقطع مستطیلی محیط بر مقطع واقعی تشکیل داد، که در هر عمقی مساحت مقطع و پیرامون مرطوب در مقطع مستطیلی مذکور از مساحت

جدول ۲. مشخصات مثال‌های صحت‌سنجی مدل.

مثال	شکل مقطع	طول رودخانه	تعداد ایستگاه‌های مشاهداتی و محل آن‌ها	شرط مرزی بالادست	شرط مرزی پایین دست
اول (فرضی)	منظم و دوزنقه‌یی متغیر در طول مسیر	۵ کیلومتر	دو عدد در ۱۲۰° و ۳۸۰° متری از ابتدای رودخانه	هیدروگراف	تراز سطح آب نسبت به زمان، شکل ۴ - ب
دوم (واقعی)	مقاطع واقعی بازه‌یی از رودخانه‌ی کوتای رودخانه	۱۸ کیلومتر	دو عدد در ۴۴۰° و ۱۳۴۰۰ متری از ابتدای رودخانه	هیدروگراف	دبی - اشل شکل ۷ - الف شکل ۷ - ب

جدول ۳. روابط هیدرولیکی شناسایی شده‌ی مثال فرضی.

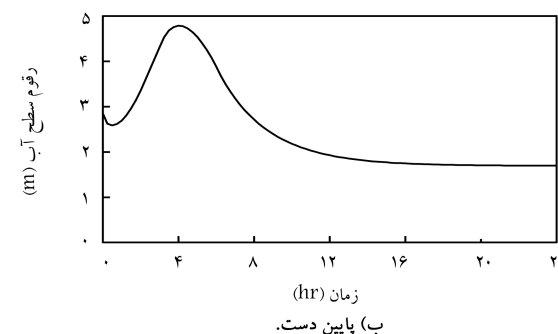
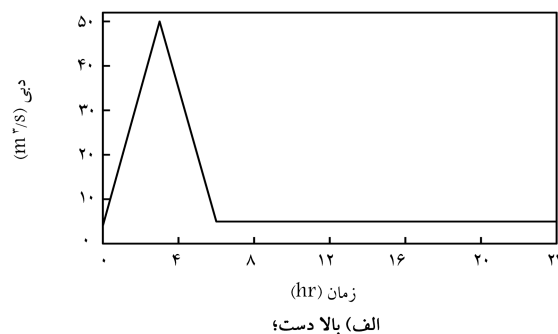
$$A_1 = 1.0 \times 10^3 (e^{0.4113y_1}) \quad A_2 = 7.55 (e^{0.409y_2})$$

$$P_1 = -24.7 (e^{-0.71y_1} - 1) \quad P_2 = -25.69 (e^{-0.57y_2} - 1)$$

جدول ۴. شاخص‌های آماری جهت ارزیابی مدل ارائه شده (مثال فرضی).

شاخص	E (%)		MAE	RMSE
	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m ³ /s)
روش ماسکینگام	۱۴/۴۴	۱/۴۱	۲۰/۸۱	۴/۵۵
مدل ارائه شده	۲/۲۱	۰/۲۷	۴/۵۵	۴/۵۵

با مقادیر کالیبره شده‌ی مذکور، روندیابی جریان به روش ماسکینگام در رودخانه‌ی فرضی انجام شد. شاخص‌های آماری جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)،^{۱۶} شاخص میانگین خطای مطلق (MEA)^{۱۷} و میانگین خطای نسبی (E)،^{۱۸} جهت ارزیابی مدل در جدول ۴ ارائه شده‌اند. با توجه به شکل ۵، که نتایج حاصل از مقایسه‌ی روابط هیدرولیکی شناسایی شده و واقعی را نشان می‌دهد، به نظر می‌رسد توانایی مدل در تشخیص روابط هیدرولیکی مساحت سطح مقطع، بهتر از تشخیص روابط هیدرولیکی پیرامون مرطوب است. البته روابط مذکور به تنهایی کاربرد ندارند و صحت عملکرد آن‌ها در مدل‌های هیدرولیکی مشخص می‌شود. در پژوهش حاضر، صحت عملکرد روابط هیدرولیکی شناسایی شده در مدل روندیابی هیدرولیکی سنجیده شده‌است. شکل ۶، صحت روابط شناسایی شده را در مدل روندیابی جریان نشان می‌دهد.



شکل ۴. شرایط مرزی رودخانه‌ی فرضی.

رقوم سطح آب انجام شده است. مشخصات دو مثال ارائه شده در جدول ۲ ارائه شده است.

۵. نتایج و بحث

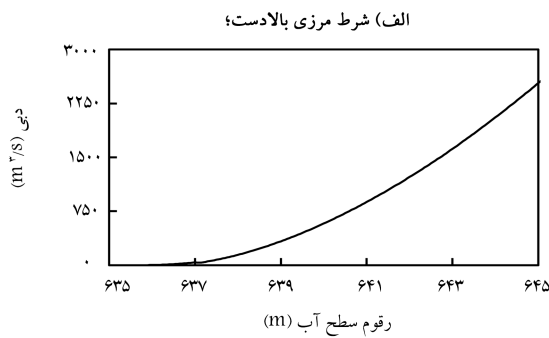
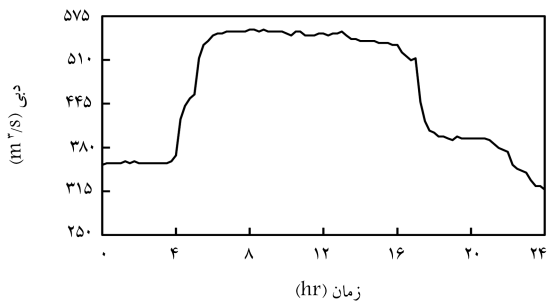
۵.۱. مثال دوم: بازه‌یی از رودخانه‌ی کوتای

۱۸ کیلومتر از بازه‌ی رودخانه‌ی کوتای^{۱۹} واقع در امریکای شمالی، به منظور ارزیابی مدل ارائه شده با داده‌های واقعی مقاطع نامنظم انتخاب شده است. شماتیک بازه‌ی مذکور از رودخانه در شکل ۸ مشاهده می‌شود، که از مقطع ۲۲۱/۲۳۸ تا مقطع ۲۱۰/۰۶۴ (شماره‌ی مقاطع بر اساس سیستم USGS^{۲۰} است) کشیده شده و ۲۵ مقطع عرضی برداشت شده دارد.^[۲۶] ایستگاه اندازه‌گیری ۱۹۳۳/۱۲۳۰ بعد از سد لیبی،^{۲۱} در ابتدای بازه‌ی اخیر قرار دارد و شرط مرزی بالادست بازه‌ی انتخابی محسوب می‌شود. در این مثال فرض شده است که دو ایستگاه مشاهداتی در طول مسیر وجود داشته باشد، با توجه به عدم وجود ایستگاه اندازه‌گیری داده‌های رقوم سطح آب نسبت به زمان در طول بازه‌ی مذکور، با مدل‌سازی رودخانه در حالت

۱.۴. مثال اول (صحت‌سنجی مدل): رودخانه با سطح مقطع

دوزنقه‌یی (فرضی)

بر طبق تئوری مدل ارائه شده، ابتدا رودخانه‌ی ذکر شده به دو زیربازه تقسیم شد و روابط ۹ الی ۱۱، برای هر زیربازه شناسایی شدند و به همراه روابط هیدرولیکی واقعی مستخرج از داده‌های مقاطع، در شکل ۵ و جدول ۳ مشاهده می‌شوند. همان‌طور که اشاره شد، رابطه‌ی ۱۱ یا رابطه‌ی هیدرولیکی عرض آزاد سطح آب، مشتق رابطه‌ی مساحت مقطع است، لذا از آوردن شکل و رابطه‌ی آن صرف‌نظر شده است. روندیابی جریان در رودخانه به ۳ روش: هیدرولیکی (داده‌های مقاطع رودخانه)، هیدرولوژیکی (ماسکینگام) و روابط هیدرولیکی شناسایی شده (مدل معکوس ارائه شده در پژوهش حاضر) در شکل ۶ مشاهده می‌شود. ضرایب α و k موجود در روش هیدرولوژیکی ماسکینگام، در ابتدا با استفاده از ۳ هیدروگراف فرضی دیگر در بالادست و پایین دست بازه‌ی موردنظر کالیبره شدند،^[۲۵] و سپس



الف) شرط مرزی بالادست؛
ب) شرط مرزی پایین دست.

شکل ۷. شرایط مرزی رودخانه‌ی واقعی.

جدول ۵. روابط هیدرولیکی شناسایی شده مثال واقعی.

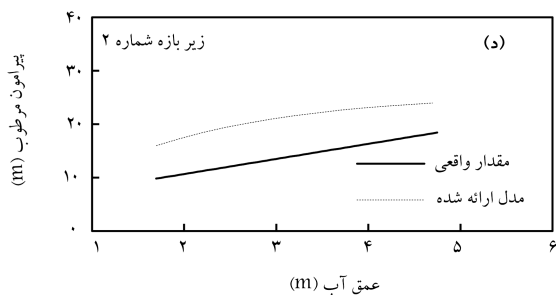
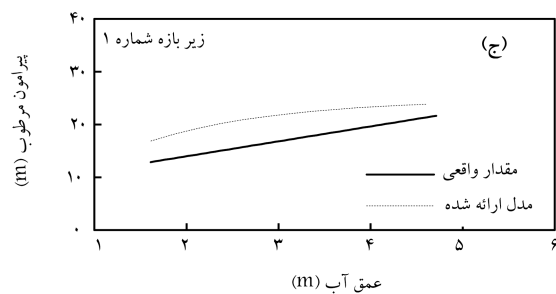
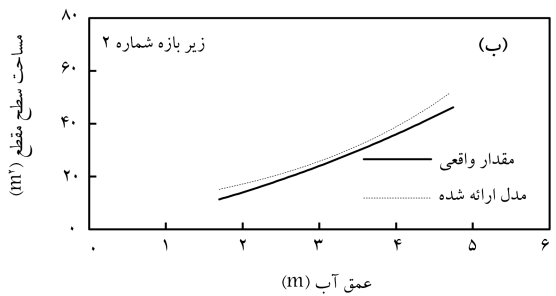
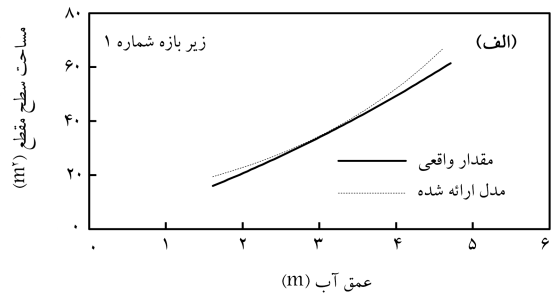
$$A_1 = 128.4 (e^{0.19y_1}) \quad A_2 = 123.4 (e^{0.22y_2})$$

$$P_1 = -20.2 (e^{-0.38y_1} - 1) \quad P_2 = -20.16 (e^{-0.56y_2} - 1)$$

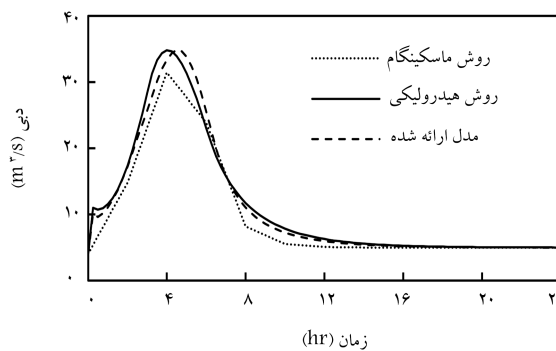
مستقیم، داده‌های مورد نیاز در طول مسیر برداشت شده است. با فرض وجود دو ایستگاه مشاهداتی، ابتدا بازه‌ی مورد مطالعه به دو زیربازه تقسیم شد و روابط ۹ الی ۱۱، برای هر زیربازه شناسایی شدند. شکل ۸ و جدول ۵ روابط هیدرولیکی شناسایی شده به همراه میانگین روابط هیدرولیکی مستخرج از مقاطع را نشان می‌دهد. به منظور صحت‌سنجی روابط هیدرولیکی به دست آمده، روندیابی جریان در ۵ و ۱۵ کیلومتری از ابتدای رودخانه به ۳ روش: هیدرولیکی، ماسکینگام و مدل ارائه شده انجام شد (شکل ۱۰) لازم به توضیح است برای اخذ ضرایب x و k موجود در روش ماسکینگام، ابتدا ضرایب x و k در ۴ مکان مذکور کالیبره شدند و سپس با مقادیر به دست آمده، روندیابی جریان در رودخانه به روش هیدرولوژیکی انجام شده است. با توجه به اینکه روندیابی سیل به روش هیدرولیکی قادر به پیش‌بینی دو پارامتر دبی و تراز سطح آب است، نتایج حاصل از پیش‌بینی رقوم سطح آب نیز در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود. این در حالی است که پارامتر تراز سطح آب قادر به پیش‌بینی توسط مدل هیدرولوژیکی ماسکینگام نخواهد بود و این یکی از مزیت‌های مدل حاضر است.

علاوه بر پیش‌بینی دبی رودخانه، مدل حاضر قادر به پیش‌بینی تراز سطح آب رودخانه نیز است. به عنوان نمونه، نتایج حاصل از پیش‌بینی رقوم سطح آب در ۹ و ۱۵ کیلومتری از ابتدای رودخانه به روش هیدرولیکی و مدل حاضر در شکل ۱۱ و جدول ۶ ارائه شده است. شاخص‌های آماری ارائه شده در جدول ۶، حاکی از توانایی مدل ارائه شده در تشخیص روابط هندسی - هیدرولیکی و صحت و کارایی روابط مذکور در مدل روندیابی جریان به روش هیدرولیکی است.

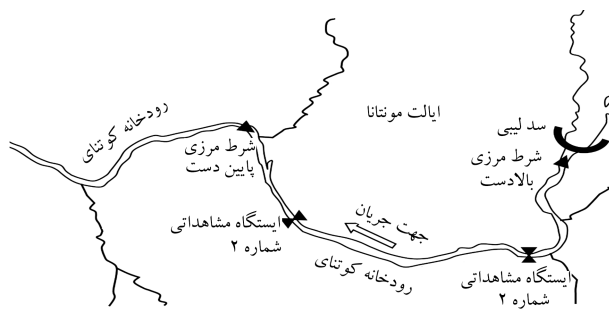
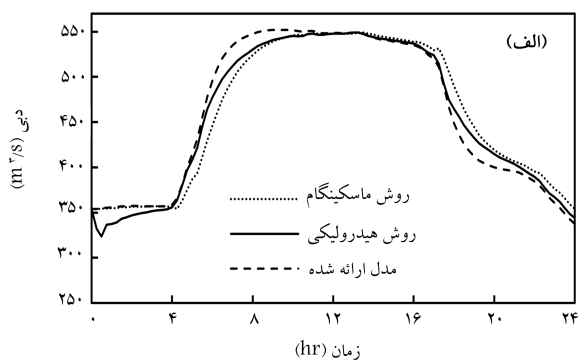
با توجه به نتایج حاصل از روندیابی جریان با استفاده از روابط هیدرولیکی به دست آمده در رودخانه با مقاطع نامنظم و واقعی، متوسط خطای ۰/۰۶۷۸ و



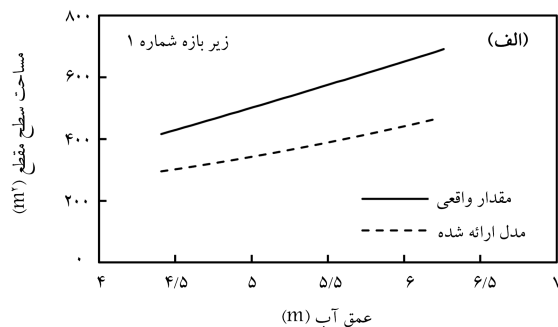
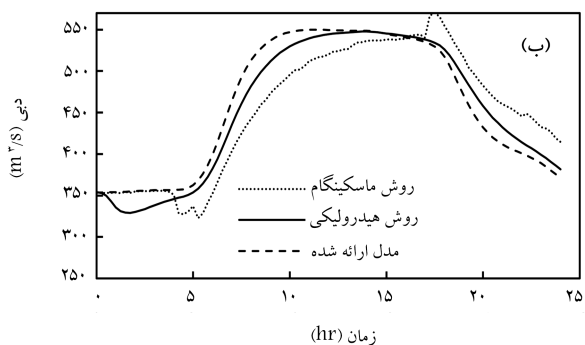
الف و ب) رابطه هیدرولیکی مساحت مقطع در زیربازه‌ی اول و دوم؛
ج و د) رابطه هیدرولیکی پیرامون مرطوب در زیربازه‌ی اول و دوم.
شکل ۵. روابط هیدرولیکی شناسایی شده.



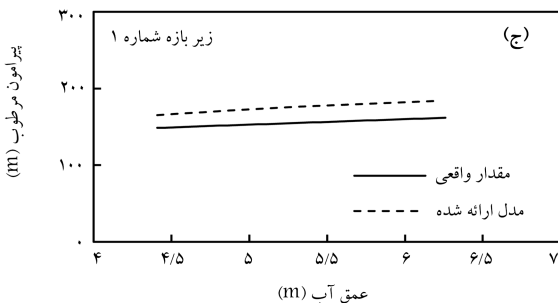
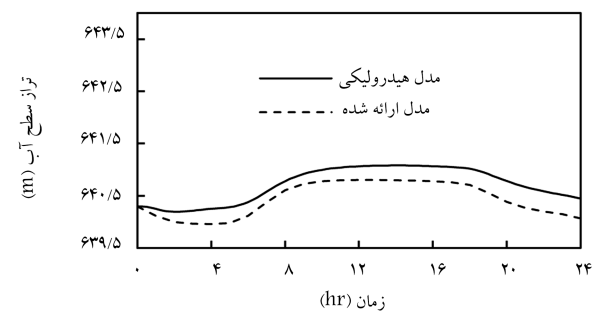
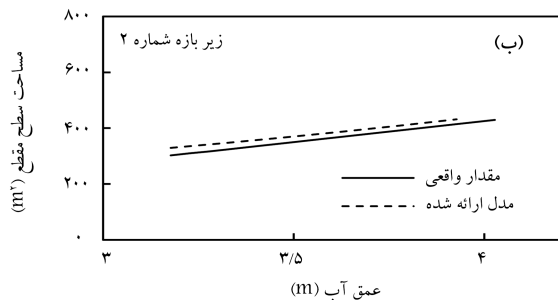
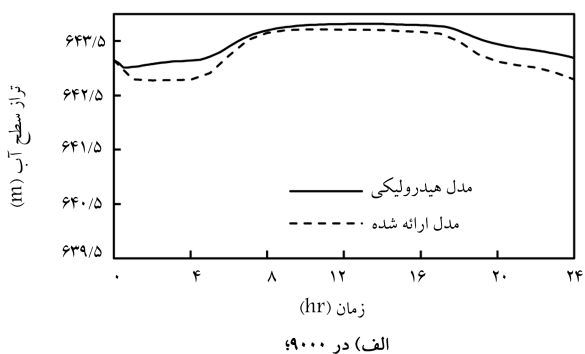
شکل ۶. روندیابی جریان در رودخانه به ۳ روش: هیدرولیکی، هیدرولوژیکی (ماسکینگام) و مدل معکوس ارائه شده.



شکل ۸. شماتیک بازه مورد شناسایی رودخانه‌ی کوتنای.



شکل ۱۰. روندیابی جریان در ۵ و ۱۵ کیلومتری از ابتدای رودخانه.



شکل ۱۱. پیش‌بینی رقوم سطح آب نسبت به زمان.

جدول ۶. شاخص‌های آماری به دست آمده به منظور مقایسه‌ی نتایج رقوم سطح آب حاصل از مدل ارائه شده و روش هیدرولیکی.

شاخص	RMSE (m)	MAE (m)	E(%)
مدل ارائه شده	۴٫۵۷	۰٫۴۳	۰٫۶۷۸

الف و ب) رابطه‌ی هیدرولیکی مساحت مقطع در زیربازه‌ی اول و دوم؛ ج و د) رابطه‌ی هیدرولیکی پیرامون مرطوب در زیربازه‌ی اول و دوم.

شکل ۹. روابط هیدرولیکی شناسایی شده.

بالتر می‌رود و می‌تواند روابط جامع‌تری را برای هر زیربازه ارائه دهد. لذا هر چه سیل بزرگ‌تری در بالادست واقع شود، روابط شناسایی شده جامع‌تر خواهند بود و قابلیت تعمیم برای سیل‌های کوچک‌تر را نیز خواهند داشت. این روابط کاربردهای زیادی دارند و می‌توانند در انواع مدل‌های هیدرولیکی، هیدرولیک رسوب، انتقال آلاینده و شبیه‌سازی زیستگاه آبزیان استفاده شوند. در پژوهش حاضر، پس از شناسایی روابط هیدرولیکی مذکور، صحت عملکرد آن‌ها در روندیابی سیل ارزیابی شده و با روندیابی سیل به روش هیدرولیکی و هیدرولوژیکی (ماسکینگام) مقایسه صورت گرفته است. روندیابی سیل در رودخانه به دو روش هیدرولیکی و هیدرولوژیکی انجام می‌گیرد. روش‌های هیدرولیکی، نیازمند مقاطع عرضی رودخانه هستند و دقت بالایی دارند، اما در اغلب موارد، روش‌های غیردقیق هیدرولوژیکی به دلیل فقدان مقاطع عرضی رودخانه به آن‌ها ترجیح داده می‌شوند. نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهند که با شناسایی روابط هیدرولیکی با استفاده از مدل‌سازی معکوس می‌توان روندیابی سیل را با دقت بسیار بالاتری نسبت به روش‌های هیدرولوژیکی در رودخانه انجام داد. هر چه تعداد زیربازه‌های موردشناسایی بیشتر باشد، دقت بیشتری از مدل حاصل می‌شود، که البته به داده‌های ورودی بیشتری نیز نیاز دارد. لازم به توضیح است که روابط به دست آمده در مجرای اصلی رودخانه صحت دارد و در مقاطع دارای سیلاب‌دشت قابل استفاده نیستند. پژوهش در زمینه تشخیص روابط هیدرولیکی مستخرج از مقاطع مرکب، موضوع پژوهش بعدی پژوهشگران نوشتار حاضر است.

۲/۸۶ درصد در تشخیص تراز سطح آب و دبی به دست آمده است. هر چه تعداد زیربازه‌های مورد شناسایی بیشتر باشد، توانایی مدل در تشخیص و شناسایی روابط هیدرولیکی بیشتر می‌شود و در حقیقت دقت مدل بالاتر می‌رود.

۶. نتیجه‌گیری

روابط هیدرولیکی مساحت مقطع، پیرامون مرطوب، و عرض آزاد سطح آب، روابط مستخرج از مقاطع عرضی رودخانه هستند، که در پژوهش حاضر بدون نیاز به برداشت پرهزینه داده‌های مقاطع عرضی، با استفاده از علم مسئله‌ی معکوس، در یک رودخانه با مقاطع عرضی نامنظم و غیرمنشوری شناسایی شده‌اند. به منظور شناسایی روابط هیدرولیکی بازه‌ی از رودخانه، باید شیب بازه، شرایط مرزی و همچنین رقم سطح آب نسبت به زمان و عرض رودخانه در بیشینه و کمینه عمق آب در وسط هر زیربازه معلوم باشد. همان‌طور که اشاره شد، اندازه‌گیری چنین داده‌هایی به مراتب ساده‌تر از نقشه‌برداری جهت برداشت داده‌های مقاطع عرضی رودخانه خواهد بود. علاوه بر این، روابط هیدرولیکی ذکر شده فقط در محدوده‌ی معین از تغییرات عمق آب درون مقطع می‌توانند مشخص و شناسایی شوند. به عبارت ساده‌تر، روابط شناسایی شده فقط در محدوده‌ی صادق‌اند که تغییرات عمق آب در مقطع صورت بگیرد و هر چه فاصله بین عمق بیشینه و کمینه در مقطع بیشتر باشد، توان شناسایی مدل

پانویس‌ها

- Huygens
- Datta et al.
- sequential quadratic problem
- Becker and Yeh
- Wormleaton & Karmegam
- Abida
- Wut
- Gessese and Sellier
- Stewardson
- Rose
- Gessese and Sellier
- Preissmann
- sequential quadratic programming
- quadratic programming
- lagrange
- root mean square error
- mean absolute error
- error
- Kootenay
- united states geological survey
- Libby dam

منابع (References)

- Jian-hua, W. and Bo, F. "Inverse problem of bottom slope design for aerator devices", *J. of Hydrodynamics*,

25(5), pp. 805-808 (2013).

- Hansen, P.C. "Rank-deficient and discrete ill-posed problems", *Numerical Aspects of Linear Inversion*, Philadelphia, SIAM (1998).
- Datta, B., Ramesh, R., Bhallamudi, S.M. and et al. "Optimal estimation of roughness in open-channel flows", *J. of Hyd. Eng.*, **126**(4), pp. 299-303 (2000).
- Fread, D.L. and Smith, G.G. "Calibration techniques for 1-D unsteady flow models", *J. of Hydraulic. Div.*, **104**(7), pp. 1027-1044 (1978).
- Wasantha Lal, A.M. "Calibration of river bed roughness", *J. of Hydrulic. Eng.*, **121**(9), pp. 664-671 (1995).
- Khatibi, R.H., Williams, J.J.R. and Wormleaton, P.R. "Identification problem of open channel friction parameters", *J. of Hydraulic. Eng.*, **123**(12), pp. 1078-1088 (1997).
- Ding, Y. and Wang, S. "Identification of manning's roughness coefficients in channel network using adjoint analysis", *Int. J. of Com. F. Dyn.*, **19**(1), pp. 1-11 (2004).
- Nguyen, H.T. and Fenton, J.D. "Identification of roughness in compound channels", *In MODSIM 2005 International congress on modelling and simulation*, Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand, pp. 2512-2518 (2005).
- Kadhim, N.K. and Abdulwahid, M.H. "Application of inverse routing methods to euphrates", *Int. J. of Civil. Eng. and Tec.*, **4**(1), pp. 97-109 (2013).

10. Cunge, J.A., Holly, F.M. and Verwey, A., *Practical Aspects of Computational River Hydraulics*, Boston (1980).
11. Szymkiewicz, R. "Solution of the inverse problem for the saint-venant equations", *J. of Hydrology*, **147**(1-4), pp. 105-120 (1993).
12. Szymkiewicz, R. "Application of the simplified models to inverse flood routing in upper narew river (Poland)", *Publications of the Institute of Geophysics, Polish Academy of Sciences*, **405**, pp. 121-135 (2008).
13. Wu, Q., Rafiee, M., Tinka, A. and et al. "Inverse modeling for open boundary conditions in channel network", *48th IEEE Conference on Decision and Control* (2009).
14. D'Oria, M., Mignosa, P. and Giovanna Tanda, M. "Bayesian estimation of inflow hydrographs in ungauged sites of multiple", *Water Resources Research*, **63**, pp. 143-151 (2014).
15. Becker, L. and Yeh, W. "Identification of parameters in unsteady open channel flow", *Water Resources Research*, **8**(4), pp. 956-965 (1972).
16. Becker, L. and Yeh, W. "Identification of multiple reach channel parameter", *Water Resources Research*, **9**(2), pp. 326-335 (1973).
17. Wormleaton, P.R. and Karmegam, M. "Parameter optimization in flood routing", *J. of Hydraulic. Eng.*, **110**(12), pp. 1799-1814 (1984).
18. Abida, H. "Identification of compound channel flow parameter", *J. of Hydrology. Hydromechanics*, **57**(3), pp. 172-181 (2009).
19. Wut, Q., Saurabh, A., Simon, M. and et al. "Parameter identification for the shallow water equations", *46th IEEE Conference on Decision and Control*, pp. 1584-1590 (2009).
20. Gessese, A. and Sellier, M. "A direct solution approach to the inverse shallow-water problem", *Mathematical Problems in Engineering*, **2012**(11) (2012).
21. Stewardson, M. "Hydraulic geometry of stream reaches", *J. of Hydrology*, **306**(1-4), pp. 97-111 (2005).
22. De Rose, R.C., Stewardson, M.J. and Harman, C. "Downstream hydraulic geometry of rivers in victoria, Australia", *Geomorphology*, **99**(1), pp. 302-316 (2008).
23. Richard, C.A., Borchers, B. and Thurber, C., *Parameter Estimation and Inverse Problems*, Academic Press (2004).
24. Wu, W. "Computational river dynamics", *CRC Press, Leiden Netherlands*, (2008).
25. Henderson, F.M. "Open Channel flow", New-York, Springer (1966).
26. Brayton, R., Director, S.W., Hachtel, G.D. and et al. "A new algorithm for statistical circuit design based on quasi-newton methods and function splitting", *IEEE Trans. Circuits and Systems*, **26**(9), pp. 784-794 (1979).
27. Barton, G.J., Moran, E.H. and Berenbrock, C. "Surveying cross sections of the Kootenai river between Libby dam, montana, and kootenay lake, British Columbia, Canada", Cooperation with U.S. Army Corps of Engineers, Idaho Department of Fish and Game, and Kootenai Tribe of Idaho, pp. 2331-1258 (2004).