



## کاربرد روش روندیابی ماسکینگام غیرخطی در پیش بینی منحنی های غلظت-زمان آلاینده ها در رودخانه ها

جعفر چابک پور\*

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۹/۰۱  
بازنگری: ۱۴۰۰/۰۳/۲۴  
پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۱۴  
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۵/۱۴

### کلمات کلیدی:

رودخانه  
آلاینده  
ماسکینگام غیرخطی  
سیلاب  
منحنی رخنه

**خلاصه:** روش ماسکینگام در هر دو نوع خطی و غیرخطی آن از روش های بسیار متداول در روندیابی سیلاب درون بازه های رودخانه ها می باشد. سادگی کار و مرحله ای بودن محاسبه دبی سیلاب خروجی از بازه رودخانه ای از مزایای این روش هستند. به دلیل شباهت شکلی هیدوگراف های خروجی از رودخانه ها و منحنی های رخنه آلاینده ها، در این مطالعه سعی گردید تا کارایی روش ماسکینگام غیرخطی به منظور پیش بینی منحنی های غلظت-زمان در پائین دست بازه رودخانه ها آزمون شود. از داده های صحرائی برداشت شده در رودخانه های مونوکیسی و آنتیاتم (برداشت شده توسط USGS) که در آن ها از آلاینده رودامین استفاده شده بود و در سنوات مختلف به ترتیب در چهار و هشت مقطع عرضی، برداشت شده بودند، استفاده شد. سری های سه تایی برای ضرایب مدل غیرخطی مذکور در هر بازه رودخانه استخراج شد و سپس منحنی های رخنه آلاینده در هر موقعیت بازسازی گردید. نتایج امر مبین این مسئله می باشد که از لحاظ ابعادی این مدل قادر به بازسازی مطلوب منحنی است ولی در بازسازی ترم انتقال حاصل از سرعت عمومی جریان، این مدل با محدودیت هایی همراه می باشد و برای رفع آن می بایستی منحنی رخنه به اندازه نسبت طول بازه به سرعت عمومی جریان شیفت داده شود. همچنین به منظور فهم بهتر تاثیر پارامترهای مدل در میزان غلظت شبیه سازی شده، آنالیز حساسیت انجام شد و مشاهده گردید که پارامترهای  $k$ ،  $m$  و  $x$  به ترتیب بیشترین تا کمترین تاثیر را در میزان غلظت آلاینده دارد. همچنین مشخص شد که پارامتر توان این مدل ( $m$ ) برای انتقال آلاینده ها، در محدوده (۱/۴-۰/۱) نوسان نموده و دارای مقدار متوسط ۰/۸۵ است. مقدار ضریب وزنی ( $x$ ) نیز در محدوده (۱- تا +۱) به دست آمد ولی درصد مقادیر بزرگ تر از صفر بیشتر بوده مقدار میانگین آن ۰/۹۱ به دست آمد.

### ۱- مقدمه

رودخانه ماسکینگام توسعه پیدا نمود. از مهم ترین چالش های این روش، تعیین پارامترهای آن است که در نوع خطی دو پارامتر و در نوع غیرخطی سه پارامتر هستند. محققان پیشین روش های بسیار متنوعی را در زمینه استفاده از روش های خطی و غیرخطی و نحوه تخمین پارامترهای آن ارائه نمودند [۱۲ و ۴]. گیل [۴] استفاده از روش حداقل مربعات را برای تخمین سه پارامتر روش ماسکینگام غیرخطی ارائه نمود ولی مشخص گردید که در صورتی که بیشتر از چندین تکرار برای حل آن لازم باشد، این روش بسیار زمان بر خواهد بود. تانگ [۵]، سه تکنیک برای برازش منحنی بر روی داده ای سیلاب ارائه نمود. وی از روش  $HH^1$  برای ایجاد ارتباط شیب تقاطعی با روش رگرسیون خطی استفاده نمود. ایشان نتایج خود را با روش گیل مقایسه نمود و ادعا نمود که روش ایشان نتایج دقیق تری را در زمان کمتری ارائه می نماید [۱۳]. یون

توانایی پیش بینی سیلاب در بخش های مختلف رودخانه از نظر طراحی سازه های حفاظتی و بهره برداری از جریان رودخانه ها بسیار مهم می باشد. داشتن این قابلیت در رودخانه ها به بهره برداران و مجاوران آن کمک می نماید تا راه حل های فنی و اقتصادی برای مقابله با امواج سیلاب در اختیار داشته باشند [۱]. در حالت کلی دو روش عمده برای پیش بینی سیلاب در رودخانه ها وجود دارد. دسته اول روش های هیدرولیکی هستند که در کامل ترین فرم خود مبتنی بر حل معادلات پیوستگی و مومنتوم هستند و دسته دوم روش های هیدرولوژیکی می باشند که با ایجاد رابطه مابین جریان های ورودی-خروجی و ذخیره سیلاب در بازه رودخانه حل می گردند [۲]. روش ماسکینگام یکی از پایه ای ترین روش های هیدرولوژیکی است که توسط مک کارتی [۳] بر روی



زمان سیلاب به چندین بازه زمانی تقسیم گردد. در هر زیربازه زمانی، پارامتر شاخص<sup>۳</sup> می‌تواند چندین مقدار به خود بگیرد همچنین نیاز کار و افضل‌ی روش ماسکینگام خطی با پارامترهای متغیر را با ارائه ۱۴ رابطه غیرخطی برای پارامترهای مدل مورد بررسی قرار دادند و اشاره نمودند که روش مورد استفاده توسط ایشان باعث افزایش دقت روندیابی سیلاب در بازه‌های رودخانه‌ای گردیده است. علاوه بر منابع فوق که در زمینه روندیابی سیلاب به روش‌های خطی و غیرخطی ماسکینگام ارائه شده است، تهیه منابع آبی مطمئن از نظر کیفی نیز یکی از چالش‌های اساسی در خصوص بهره‌برداری از جریان رودخانه‌ها می‌باشد. پارامترهای هندسی و شیمیایی زیادی در کیفیت جریان آب رودخانه‌ها تاثیرگذار هستند و خاصیت خودپالایی آن‌ها را تحت تاثیر قرار می‌دهند [۱۷ و ۱۶]. مدل‌های شبیه‌سازی کیفیت جریان و پیش‌بینی نحوه انتقال آلاینده‌ها در رودخانه‌ها به عنوان ابزاری هستند که برای پیش‌بینی غلظت آلاینده‌ها را در مقاطعی که داده‌های اندازه‌گیری شده در آن‌ها وجود ندارد، مورد استفاده قرار می‌گیرند. با این وجود کمبود دانش در این زمینه می‌تواند پیش‌بینی‌ها را تحت تاثیر قرار داده و اعتماد به نتایج آن‌ها را کاهش دهد [۱۹ و ۱۸]. پس می‌توان نتیجه‌گیری نمود که درک عمیق‌تر از این پدیده و افزایش دقت مدل‌های شبیه‌سازی انتقال آلاینده‌ها ابزار کلیدی در افزایش کیفیت منابع آب مورد استفاده است [۲۰]. البته قابل ذکر است که اکثر تحقیقات حاضر در زمینه مدل‌سازی انتقال آلاینده‌ها و روش ماسکینگام به ابداع و ارائه روش‌های به روز در زمینه تخمین پارامترهای انتقال مربوط می‌باشد. تائو و همکاران [۲۱] با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری<sup>۴</sup> تابع چند هدفه ایجاد شده را مورد بررسی قرار داد و نتایج آن را با الگوریتم تراکم ذرات<sup>۵</sup> مورد مقایسه قرار داد. ایشان در پژوهش خود از داده‌های رودخانه آنکانگ<sup>۶</sup> استفاده نمود و در نهایت نتیجه‌گیری نمود که روش بهینه‌سازی گرگ خاکستری روش بهتری برای تخمین پارامترهای روش ماسکینگام می‌باشد. فرزین و همکاران [۲۲] روش ماسکینگام سه‌پارامتری را با الگوریتم بهینه‌سازی خفاش<sup>۷</sup> ترکیب نمود تا روش بهتری را برای تخمین پارامترهای آن ارائه نماید. قابل ذکر است که ایشان در تحقیقات خود وجود جریان‌های جانبی را نیز لحاظ نموده و برای به دست آوردن دقت بیشتر، یک بازه رودخانه را برای به چندین زیربازه تقسیم نمود. تایفور و

و پادمان‌آبهان [۶] یک تکنیک غیرخطی با تخمین‌های اولیه از نوع خطی ارائه نمودند. ایشان در نهایت یک الگوریتم تکراری ارائه کردند که بر مبنای برازش منحنی غیرخطی استوار بود. موهان [۷] یا استفاده از روش الگوریتم ژنتیک، اقدام به ارائه یک روش جایگزین برای تخمین پارامترهای ماسکینگام غیرخطی نمود و کارکرد بهتر آن را نسبت به سایر روش‌های ارائه شده توسط محققین پیشین گزارش نمود. کیم [۸] از الگوریتم جستجوی هارمونی برای پیدا نمودن پارامترهای مدل غیرخطی استفاده نمود و ادعا نمود که روش جستجوی هارمونی نسبت به روش الگوریتم ژنتیک جواب‌های بهتری ارائه می‌نماید و همچنین لازم نیست که جواب‌های اولیه انتخاب شده برای آن نزدیک به جواب‌های بهینه باشند. داس [۹] با استفاده از حاصل ضرب لاگرانژی، ضرایب مدل خطی و غیرخطی ماسکینگام را استخراج نمود. این روش یک مسئله بهینه‌سازی مقید را به روش بهینه‌سازی نامقید تبدیل می‌نماید ولی نتایج مستخرج از این روش به اندازه سایر روش‌های پیشین موفق نبود [۱۲]. داس [۱۰]، بر اساس یک مدل بهینه‌سازی مبتنی بر روش احتمالاتی اقدام به ارائه روشی برای محاسبه ضرایب مدل ماسکینگام نمود. مدل ارائه شده توسط وی بسیار پیچیده بوده و برای محاسبه ضرایب مزبور نیاز به زمان زیادی داشت. چو و چانگ [۱۱] بر اساس تکنیک PSO اقدام به محاسبه ضرایب مدل ماسکینگام غیرخطی نمود. مزیت روش استفاده شده توسط ایشان بر مبنای قابلیت روش PSO است که نیاز به حدس‌های اولیه برای شروع بهینه‌سازی ندارد ولی این روش نیز جواب‌های مطلوبی اراده نمی‌نماید. لو و ژی [۱۲] از الگوریتم انتخاب کولونال<sup>۲</sup> به منظور محاسبه پارامترهای مدل غیرخطی ماسکینگام استفاده نمود. الگوریتم مورد استفاده توسط این محققین یک الگوریتم هوشمند بود که قادر بود از حل نامناسب معادلات جلوگیری نموده و در صورت لزوم سرعت محاسبات را افزایش دهد. با این وجود برای تخمین پارامترهای الگوریتم لازم است تا آنالیز حساسیت انجام شود. با وجود مطالعات قبلی انجام شده توسط محققین، هنوز دقت پیش‌بینی سیلاب به اندازه دقت لازم در مطالعات هیدرولیکی نبوده و کنکاش بیشتری در این خصوص احساس می‌گردید. لذا تعداد دیگری از محققان اقدام به ارائه پارامترهای متغیر در فرآیند روندیابی نمودند. در این زمینه می‌توان به مطالعات ایاسا [۱۴]، نیازکار و فضل‌ی [۱۵] اشاره نمود. در این گونه مدل‌ها که بر مبنای پارامترهای غیرفیزیکی عنوان شده‌اند، پارامترهای مدل غیرخطی ماسکینگام می‌تواند در هر مرحله از محاسبات تغییر نماید. در مدل ارائه شده توسط ایاسا، از یک پارامتر بدون بعد اضافی استفاده گردید تا

3 Exponent Parameter  
4 GW  
5 PSO  
6 Ankan  
7 Bat Algorithm

1 Particle Swarm Optimization  
2 Immune Clonal Selection

نمودند که بر مبنای روش‌های سلول‌های سری و روش تأخیری یک روش جامع برای بازسازی معکوس داده‌ها در این زمینه ارائه نمایند. نوروزی و بازرگان [۲۹] با استفاده از مدل ماسکینگام، عبور جریان از یک سیستم دوگانه از سدهای سنگ‌ریزه‌ای را مورد بررسی قرار دادند. ایشان در پژوهش خود پارامترهایی مانند قطر سنگدانه‌ها، طول سدهای سنگ‌ریزه‌ای و فاصله کارگزاری آن‌ها را مورد بررسی قرار دادند و اثر این تغییرات در پارامترهای مدل ماسکینگام و کارایی آن مورد کنکاش قرار گرفت. در این تحقیق همچنین مقایسه‌ای مابین روش ماسکینگام و الگوریتم بهینه‌سازی ذرات انجام شد و نتیجه مبین این بود که روش ماسکینگام نسبت به الگوریتم ذرات دقت بیشتری دارد. نصرآبادی و همکاران [۳۰] اثر جذب آلاینده کادمیوم توسط رسوبات بستر رودخانه‌ای را بر ضرایب انتشار طولی آلاینده مورد بررسی قرار دادند. تحقیق ایشان بر مبنای داده‌های آزمایشگاهی در یک فلوم بسته و مدل‌سازی عددی استوار بود. در این پژوهش ایشان آزمایش‌های خود را بر مبنای دو حالت با و بدون رسوبات بستر قرار دادند و تاثیر وجود رسوبات را در میزان جذب و ضریب انتشار طولی مورد بررسی قرار دادند.

با دقت در منابع مورد بررسی هم در زمینه روندیابی سیلاب و هم در زمینه انتقال آلاینده‌ها می‌توان ادعان داشت که روش ماسکینگام در هر دو نوع خطی و غیرخطی خود از قابلیت و کارایی لازم برای پیش‌بینی سیلاب برخوردار است. همچنین تامین منابع با کیفیت آب به منظور استفاده‌های شرب و بهداشتی از مسائل چالش برانگیز در رودخانه‌ها می‌باشد که نیاز اساسی به استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی کیفی دقیق را نشان می‌دهد. به دلیل شباهت اشکال هیدروگراف‌های سیلاب و منحنی‌های رخنه آلاینده‌ها که از بازه‌های رودخانه‌ای استخراج شده‌اند، در این پژوهش سعی شد تا کارایی این روش برای پیش‌بینی غلظت آلاینده‌ها در قسمت‌های مختلف بازه‌های رودخانه‌ای نیز مورد آزمون قرار گیرد تا مشخص شود که آیا این مدل می‌تواند مدل‌سازی دقیقی را انجام دهد یا نه؟ برای این منظور نیز ابتدا باید پارامترهای مدل از منحنی‌های مشاهداتی تخمین زده شده و سپس منحنی‌های شبیه‌سازی شده استخراج شود. به بیان دیگر این پژوهش کوششی است تا از طریق آن بتوان از دانش قبلی در زمینه این مدل متداول در حرکت موج سیلاب به منظور استخراج داده‌های غلظت نیز استفاده شود. همچنین در این پژوهش از داده‌های اندازه‌گیری شده غلظت-زمان در دو رودخانه آنتیاتم و مونوکیسی برای رسیدن به اهداف پژوهش استفاده گردید.

همکاران [۲۳] با استفاده از الگوریتم ماشین بردار اقدام به روندیابی سیلاب در بازه رودخانه نمود. ایشان نتایج خود را با نتایج حاصل از روش‌های شبکه عصبی، الگوریتم ژنتیک<sup>۱</sup>، الگوریتم تراکم ذرات و الگوریتم کولونی مورچه<sup>۲</sup> مقایسه نمود و نتایج حاصل از روش ماشین بردار را دقیق‌تر دانست. همچنین ایشان در تحقیقات خود از داده‌های اندازه‌گیری شده در رودخانه تایبر<sup>۳</sup> ایتالیا برای فرآیند آموزش روش‌های مذکور استفاده نمود. علاوه بر موارد فوق‌الذکر، تعدادی از محققان نیز حتی به بررسی عدم قطعیت در این مدل‌ها پرداخته‌اند. خراشادی زاده و همکاران [۲۴] با استفاده از روش GLEU به بررسی عدم قطعیت مدل انتقال آلاینده پرداختند. ایشان با به کارگیری معادلات آب‌های کم‌عمق و خطی نمودن آن‌ها، اقدام به حل معادلات نموده و با اعمال این روش بر روی سه پارامتر واسنجی مدل انتقال آلاینده، از شاخص مربعات خطا برای اعمال آستانه قابل پذیرش استفاده نمود. بری و باجراچاریا [۲۵] بررسی کاملی بر روی روش ماسکینگام-کونژ انجام دادند. ایشان گام‌های زمانی و گام‌های مکانی در این روش را مورد بررسی قرار دادند و در نهایت نتیجه‌گیری نمودند که دقت این روش بستگی به عدد کوورانت و نسبت گام‌های زمانی و مکانی به همدیگر است و ترکیب بهینه این گام‌ها با یکدیگر منجر به ایجاد نتیجه بهتری می‌شود. همچنین ایشان از مفهوم ذخیره‌سازی موقت آلاینده‌ها در ستون‌های ماسه‌ای، برای به دست آوردن گام‌های زمانی و مکانی بهینه استفاده نمودند. کوسیوس [۲۶] به صورت انتقادی به بررسی روش‌های ماسکینگام و کالینی پرداخت. ایشان سعی نمود تا برای ضرایب روش ماسکینگام بر مبنای روش‌های هیدرولیکی، روابطی را ارائه نماید. در این پژوهش غیرخطی بودن ضرایب این روش‌ها نیز مورد بررسی قرار گرفت و روش‌های جایگزینی برای محاسبه عمق جریان و جریان‌های جانبی ارائه شد. زنگ و همکاران [۲۷] از مدل‌های رگرسیونی خطی و غیرخطی برای تخمین پارامترهای مدل توماس به منظور شبیه‌سازی انتقال آلاینده‌ها از یک ستون ماسه‌ای استفاده نمود. آنالیز خطای انجام شده نیز نشان داد که هر دو روش از کارایی مناسبی برای مدل‌سازی برخوردار هستند ولی روش غیرخطی با دقت بهتری ضرایب مدل را پیش‌بینی می‌نماید. کوسیوس و مازی [۲۸] روش معکوس روندیابی سیلاب و آلاینده‌ها از پایین‌دست به بالادست را مورد ارزیابی قرار دادند. روش ارائه شده توسط ایشان بر مبنای بازسازی منحنی‌های رخنه آلودگی در بالادست بر مبنای داده‌های پایین دست بود. ایشان سعی

- 1 Machine Learning Methods
- 2 Genetic Algorithm
- 3 Ant Colony
- 4 Tiber River

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱ مدل ماسکینگام غیرخطی

در حالت کلی، مدل ماسکینگام خطی توسط روابط پیوستگی و ذخیره‌ای مطابق با روابط (۱) و (۲) در رودخانه‌های طبیعی ارائه می‌شوند.

$$\frac{dS_t}{dt} = I_t - Q_t \quad (1)$$

$$S_t = k [xI_t + (1-x)Q_t] \quad (2)$$

که در آن‌ها،  $S_t$  ذخیره مجرای رودخانه در زمان  $t$ ،  $I_t$  و  $Q_t$  به ترتیب دبی جریان ورودی و خروجی به بازه رودخانه در زمان  $t$ ،  $k$  پارامتر ذخیره‌ای جریان در بازه رودخانه و  $x$  ضریب وزنی که مشخصه‌ای از بازه رودخانه است. پارامترهای مدل خطی ماسکینگام ( $k$  و  $x$ ) از روی سیلاب‌های قبلی استخراج می‌گردند. قبلاً اشاره شده است که پارامتر زمانی  $k$  تقریباً برابر با مدت زمان عبور دبی اوج از بازه رودخانه بوده و ضریب وزنی  $x$  معمولاً با آزمون و خطا بر روی داده‌های اندازه‌گیری شده به دست می‌آید. مدل ماسکینگام خطی معمولاً دقت کمتری در زمینه پیش‌بینی سیلاب داشته و برای افزایش دقت تخمین آن از مدل غیرخطی ماسکینگام (رابطه ۳) که توسط گیل (۱۹۷۸) ارائه شده است استفاده می‌شود.

$$S_t = k [xI_t + (1-x)Q_t]^m \quad (3)$$

که در رابطه فوق،  $S_t$  ذخیره وزنی و  $m$  پارامتر توانی که میزان غیرخطی بودن رفتار بازه رودخانه را تعریف می‌نماید. برای تخمین دبی خروجی، رابطه (۳) مجدداً بازنویسی شده و بر اساس جریان خروجی به صورت رابطه (۴) ارائه می‌گردد [۱۸ و ۸].

$$Q_t = \left( \frac{1}{1-x} \right) \left( \frac{S_t}{K} \right)^{\left( \frac{1}{m} \right)} - \left( \frac{x}{1-x} \right) I_t \quad (4)$$

و همچنین با بازنویسی رابطه پیوستگی (رابطه ۱) و رابطه (۴)، رابطه (۵) برای نرخ ذخیره جریان در بازه رودخانه‌ای حاصل می‌گردد.

$$\frac{\Delta S_t}{\Delta t} = - \left( \frac{1}{1-x} \right) \left( \frac{S_t}{K} \right)^{\left( \frac{1}{m} \right)} + \left( \frac{1}{1-x} \right) I_t \quad (5)$$

که در آن  $\frac{\Delta S_t}{\Delta t}$  برابر با نرخ تغییر ذخیره جریان در بازه رودخانه،  $\Delta S_t$  تغییر ذخیره جریان در بازه رودخانه و  $\Delta t$  مدت زمان تغییر حجم ذخیره جریان می‌باشد که بر اساس مفاهیم مدل‌سازی موج سینماتیک می‌بایستی بزرگ‌تر از  $2kx$  باشد.

در این مطالعه به منظور بازنویسی پارامترهای جریان بر اساس پارامترهای غلظت ورودی و خروجی، روابط (۱) تا (۵) به گونه‌ای بازنویسی گردیده‌اند که به جای  $I_t$ ،  $Q_t$ ،  $S_t$ ،  $\Delta S_t$  به ترتیب پارامترهای  $CI_t$ ،  $CQ_t$ ،  $CS_t$  و  $\Delta CS_t$  قرار گرفته و ضرایب مدل ( $x$ ،  $k$  و  $m$ ) نیز به صورت بدون تغییر باقی بماند.

با لگاریتم‌گیری از طرفین رابطه (۳) و بازنویسی پارامترهای آن، رابطه (۶) حاصل می‌گردد.

$$\begin{aligned} \ln(CS_t) &= \ln(k) + m \times \\ &\ln(x \times CI_t + (1-x) \times CQ_t) \end{aligned} \quad (6)$$

با دقت در رابطه فوق می‌توان گفت که با معلوم بودن ضریب وزنی  $x$  و ایجاد رگرسیون خطی مابین پارامترهای  $\ln(CS_t)$  و  $\ln(x \times CI_t + (1-x) \times CQ_t)$ ، شیب خط برابر با  $m$  بوده و عرض از مبدا آن نیز برابر با  $\ln(k)$  خواهد بود. برای محاسبه ضریب وزنی  $x$  نیز از رابطه (۷) استفاده گردید.

$$x = \frac{1}{2} - \frac{Q_0}{2S_0 Bc \Delta X} \quad (7)$$

که در رابطه فوق  $Q_0$  دبی پایه بازه رودخانه،  $S_0$  شیب طولی بازه



شکل ۱. (الف) عکس ماهواره‌ای از رودخانه آنتیاتم، (ب) عکس ماهواره‌ای از رودخانه مونوکیسی

Fig. 1. (a) Satellite image from Antietam Creek, (b) Satellite image from Monocacy River

روستایی هستند، اما بخشی که اطراف شهر هگراستون<sup>۳</sup> را در برمی‌گیرد با تهدید شهرک‌سازی مواجه است. به علت کشت بالا در این منطقه و ورود پساب‌های مزارع به این رودخانه، نگرانی در باب کیفیت آب تشدید شده است. بخش مدیریت محیط زیست مریلند به کشاورزان توصیه دارد که بهترین شیوه مدیریتی در زمین خود را برای کنترل پساب‌ها اجرا کنند. در طی آزمایش‌های انجام شده برای برداشت داده‌های غلظت-زمان، از آلاینده رودامین به عنوان یک آلاینده با بقای جرمی<sup>۴</sup> استفاده شده است و تزریق آلاینده در مقطع رودخانه نیز به صورت آبی بوده است. قابل ذکر است که در روش‌های روندیابی خطی و غیرخطی ماسکینگام نیز همیشه بقای جرم جریان مدنظر بوده و لذا می‌توان گفت که مدل مورد استفاده با فیزیک مسئله انتقال آلاینده‌ها تطابق دارد. تعداد موقعیت‌های در نظر گرفته شده برای ثبت داده‌های غلظت آلاینده برای رودخانه آنتیاتم<sup>۴</sup> و برای رودخانه مونوکیسی<sup>۴</sup> و ۸ موقعیت بوده است. لذا با استفاده از منحنی رخنه اول به عنوان ورودی می‌توان حداقل سه زیربازه برای هر دو رودخانه لحاظ نموده و بعد از استخراج پارامترهای مدل روندیابی منحنی‌های رخنه آلاینده بر روی آن‌ها را نیز انجام داد. در جدول ۱ مشخصات کلی داده‌های مورد استفاده در انجام این پژوهش مورد اشاره قرار گرفته است. در شکل ۱ عکس ماهواره‌ای بازه‌های مورد مطالعه از هر دو رودخانه نمایش داده شده است.

رودخانه،  $B$  عرض متوسط رودخانه،  $C$  سرعت حرکت موج در بازه رودخانه که از رابطه  $C = 1.67U_0$  محاسبه می‌گردد و در این رابطه نیز  $U_0$  برابر با سرعت متوسط جریان در دبی پایه رودخانه فرض شده و  $\Delta X$  نیز طول بازه رودخانه می‌باشد.

## ۲-۲- منحنی‌های رخنه اندازه‌گیری شده در بازه‌های مختلف رودخانه‌های آنتیاتم و مونوکیسی

داده‌های غلظت-زمان مورد استفاده در این پژوهش مربوط به رودخانه‌های مونوکیسی<sup>۱</sup> و آنتیاتم<sup>۲</sup> در ایالات متحده است که توسط USGS برداشت گردیده است. رودخانه مونوکیسی در شهر کارول مریلند، در غرب شهر هارنی در مرز مریلند-پنسیلوانیا جریان دارد. تقریباً ۶۰ درصد از حوضه آبریز این رودخانه به کشاورزی اختصاص دارد. شهر فردریک و حومه آن بزرگ‌ترین منطقه شهری در این حوضه هستند. این یکی از بزرگ‌ترین مشکلات این حوضه، وجود آلودگی‌هایی بدون مشخص بودن منبع است که به دلیل ورود آلاینده‌ها از ۳۵۰۰ واحد مزرعه، دامداری و کارگاه‌های لبنیات از این حوضه آبریز می‌باشد. طول رودخانه آنتیاتم ۶۷/۵ کیلومتر می‌باشد و در جنوب مرکزی پنسیلوانیا و غرب مریلند در ایالات متحده واقع شده است. مساحت حوضه آبریز آن ۷۵۰ کیلومتر مربع بوده و اکثر بخش‌های آن نسبتاً

3 Hagerstown  
4 Conservative

1 Monocacy River  
2 Antietam Creek



جدول ۱. مشخصات داده های صحرایی برداشت شده در رودخانه های مونوکیسی و آنتیاتیم (اخذ شده از USGS)

Table 1. Characteristics of the gathered field data series in the rivers of MONOCACY AND ANTIETAM

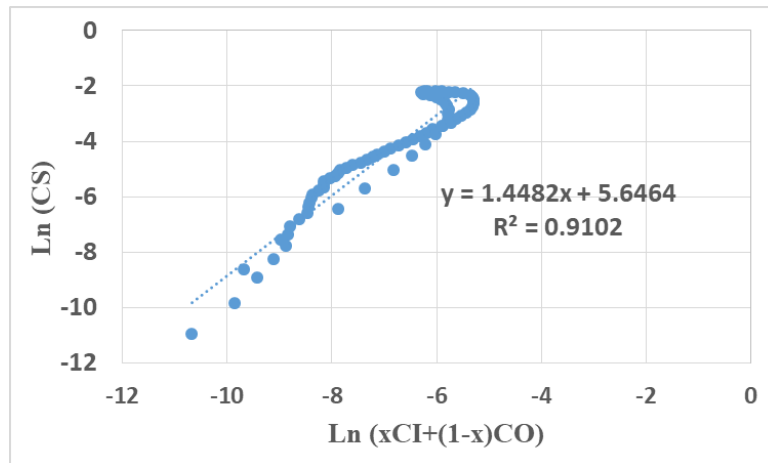
نام رودخانه و تاریخ نمونه برداری	شماره موقعیت مکانی Site	طول ایستگاه نسبت به نقطه تزریق L (km)	دبی رودخانه در ایستگاه Q (m <sup>3</sup> /s)	غلظت حداکثر مشاهداتی Cmax (ppb)	زمان رخداد غلظت حداکثر t <sub>p</sub> (hr)	زمان متوسط منحنی رخنه $\bar{t}$ (hr)	واریانس منحنی رخنه $\sigma_t^2$ (hr <sup>2</sup> )	ضریب چولگی منحنی رخنه
رودخانه مونوکیسی (June, 7, 1968)	۱	۶/۴	۱۴/۳۲	۱۸/۵	۷/۱	۷/۹۱	۱/۱۱	۱/۵۸
	۲	۱۱/۴	۱۵/۱۸	۱۱/۵۴	۱۳/۶	۱۴/۲۵	۱/۹۸	۱/۰۶
	۳	۱۶/۶۵	۱۵/۸۹	۹/۱۷	۱۹/۶	۲۰/۳۶	۲/۶۴	۰/۷۲
	۴	۲۱/۳	۱۸/۰۱	۷/۲۲	۲۵/۸	۲۶/۵۶	۵/۰۴	۱/۰۵
رودخانه آنتیاتیم (24, March, 1970)	۱	۱/۶	۵/۱۰	۳۳۱	۱/۳۵	۱/۴۵	۰/۰۴۴	۱/۸۰
	۲	۵/۹۵	۵/۲۴	۱۴۵/۷۴	۵/۵	۵/۶۹	۰/۲۵۲	۲
	۳	۱۳/۳۳	۷/۳۷	۷۶/۴۱	۱۵/۹	۱۶/۲۳	۱/۵۸۲	۳/۰۷
	۴	۱۸/۴۰	۷/۸۰	۳۸/۹۰	۲۳/۴	۲۴/۰۱	۲/۱۶۱	۲
	۵	۲۶/۲۵	۸/۵۱	۳۶/۹۳	۳۳/۲	۳۴/۰۲	۴/۳۲۳	۱/۶۲
	۶	۳۰/۵۵	۱۰/۲۱	۳۴/۷۲	۳۳	۳۸/۵۵	۳/۵۸۵	۱/۰۱
	۷	۳۶/۸۰	۱۲/۲	۳۲/۰۷	۴۳/۳	۴۴/۳۷	۵/۰۰۵	۱/۱
	۸	۴۱/۴۵	۱۲/۷۶	۲۸/۰۴	۴۷/۴	۴۸/۲۰	۶/۰۰۲	۱/۱۵

### ۳- نتایج و بحث

با توجه به روابط مورد اشاره در بخش قبلی، هر سه پارامتر مورد بحث مدل ماسکینگام غیرخطی استخراج گردیده و در ادامه منحنی‌های غلظت-زمان تحلیلی با استفاده از آن‌ها ترسیم گردید. برای استخراج مقادیر توان مدل خطی (□)، مابین لگاریتم پارامترهای  $(x \times CI_t + (1-x) \times CQ_t)$  و  $(CS_t)$  رابطه خطی برقرار شده و با فرض مقادیر مختلف برای پارامتر ضریب وزنی  $x$  و با استفاده از برقراری ارتباط خطی مابین آن‌ها، ضریب مربوطه استخراج گردیده است. شکل ۲ نمونه‌ای از برازش‌های برقرار شده را نشان می‌دهد. با ادامه روش و استخراج دو پارامتر زمانی  $k$  و ضریب وزنی  $x$ ، بعضاً مشخص گردید که منحنی‌های بازسازی شده از دقت لازم برخوردار نمی‌باشند لذا با استفاده از تکنیک بهینه‌سازی کمترین مربعات و بر اساس داده‌های ورودی و خروجی آلاینده به بازه مورد نظر رودخانه‌ای، معادله (۴) مورد استفاده قرار گرفته و ضرایب جدیدی استخراج گردید. نتایج امر مبین این مطلب است که هر دو روش از کارایی مطلوبی برای استخراج پارامترهای مدل غیرخطی ماسکینگام برخوردار هستند و زوج‌های سه تایی استخراج شده

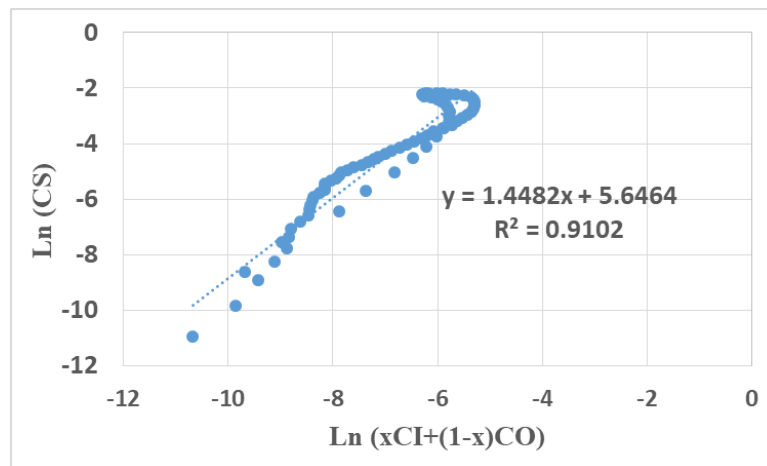
بعضاً در محدوده‌های متداول تعریف شده برای مدل خطی نمی‌باشند. به عنوان مثال ضریب  $x$  به دست آمده از تکنیک کمترین مربعات گاه‌ها شامل مقادیر منفی نیز است. علاوه بر آن با وجود اینکه این مدل دقت مطلوبی از نظر بازسازی منحنی رخنه دارا است ولی منحنی استخراج شده بایستی به اندازه  $(\frac{L}{u})$  انتقال داده شود.  $L$  طول بازه رودخانه بوده و  $u$  سرعت متوسط جریان در بازه رودخانه است. به بیان دیگر به نظر می‌رسد که این مدل در مدل‌سازی فاز انتقال آلاینده توسط سرعت عمومی جریان دارای نقایصی می‌باشد که با شیفت زمانی منحنی استخراج شده به میزان  $(\frac{L}{u})$  این نقیصه برطرف می‌گردد. در شکل ۳ تعدادی از منحنی‌های غلظت-زمان صحرایی در مقابل منحنی‌های شبیه‌سازی شده از طریق روش ماسکینگام غیرخطی در چهار موقعیت مکانی از رودخانه مونوکیسی ارائه شده است.

با دقت در شکل ۳ مشاهده می‌گردد که روش ماسکینگام غیرخطی با اعمال شیفت زمانی منطبق بر سرعت عمومی جریان در بازه رودخانه، به خوبی قادر به مدل‌سازی منحنی‌های غلظت-زمان می‌باشد. علاوه بر موارد مذکور، دقت در مقادیر پارامترهای استخراج شده نیز و میزان و نحوه تغییرات آن‌ها نیز می‌تواند شامل اطلاعات ارزنده‌ای باشد. به همین جهت،



شکل ۲. برقراری خط رگرسیونی مابین ذخیره آلاینده و پارامتر ذخیره ماسکینگام غیرخطی

Fig. 2. The regression line establishment between the pollutant storage and the nonlinear Muskingum storage parameter



شکل ۳. شبیه سازی منحنی های غلظت زمان در رودخانه مونوکسیسی با دبی ۵/۹ مترمکعب بر ثانیه

Fig. 3. (Simulation of concentration-time curves in Monocacy River with the discharge of 5.9 m<sup>3</sup> /s

ضرایب استخراج شده بعد از کلاس بندی مورد تحلیل آماری قرار گرفته و منحنی های احتمالاتی نرمال بر روی آن ها برازش گردید (شکل ۴). ضریب توانی ماسکینگام غیرخطی برای تمامی داده های برداشت شده در مقاطع مختلف رودخانه های مونوکیسی و آنتیام در محدوده (۰/۱-۱/۴) بوده همان طوری که در بخش الف شکل ۴ مشخص شده است، در محدوده عدد یک نوسان می نماید. البته درصد ضرایب کمتر از یک بیشتر از ضرایب بیشتر از یک می باشند. مقدار متوسط ضرایب توانی به میزان ۰/۸۵ و واریانس آن نیز برابر با ۰/۱۳۱ به دست آمد. به همین ترتیب انحراف از میانگین داده های استخراج شده نیز برابر با ۰/۳۶ محاسبه شد. همچنین قابل ذکر است که برخلاف پارامترهای توانی استفاده شده در روندیابی سیلاب که تا عدد ۳ تخمین زده می شود، مقادیر بیشتر از ۱/۵ برای روندیابی آلاینده ها با استفاده از روش مورد بحث به دست نیامد.

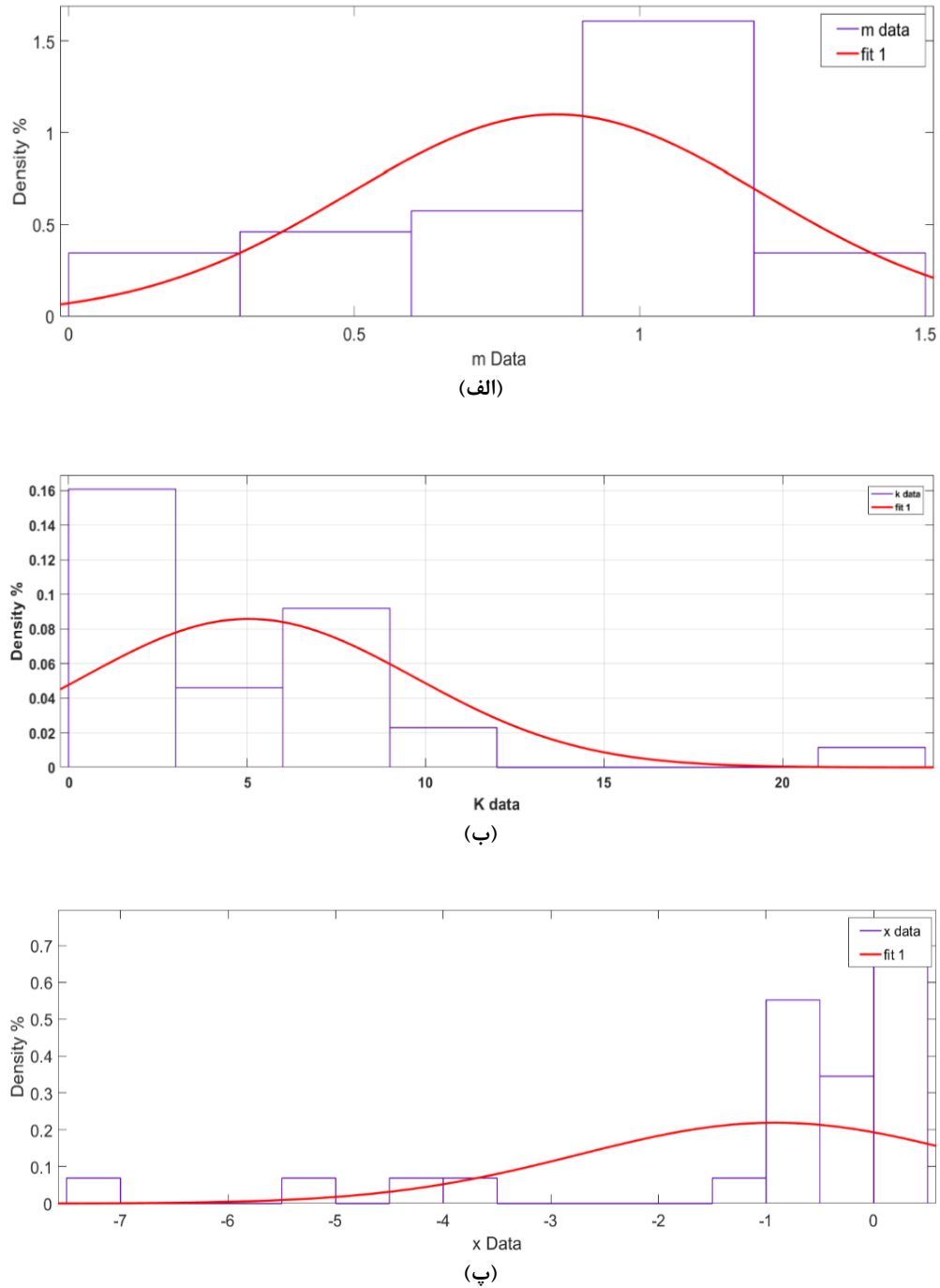
در بخش ب شکل ۴، توزیع ضرایب زمانی  $k$  مورد ارزیابی قرار گرفته و مشخص گردید که مقادیر این پارامتر در محدوده (۰/۲۶-۲۳) قرار گرفته است. با توجه به مشخصات داده های برداشتی که بر حسب ساعت می باشند، اعداد به دست آمده دارای میانگین ۵ ساعت هستند. دقت در نحوه توزیع این پارامتر مبین این نکته می باشد که داده ها دارای چولگی مثبت بوده درصد زیادی از آن در محدوده کمتر از ۱۰ ساعت توزیع شده است. انحراف از میانگین این پارامتر در حدود ۴/۶۵ ساعت بوده که نشان دهنده توزیع گسترده آن در بازه مورد بحث می باشد. در بخش پ شکل ۴ نیز مقادیر مربوط به ضریب وزنی  $x$  مورد نمایش داده شده است. همان طوری که قبلاً ذکر گردیده است، برخلاف آنچه که در روندیابی سیلاب وجود دارد، مقادیر منفی نیز برای آن استخراج شده است و اکثر داده های به دست آمده برای آن در محدوده  $+0/5$  و  $-0/5$  متمرکز شده اند. مقدار میانگین آن ۰/۹۱ بوده و همچنین مقدار انحراف از میانگین آن ۱/۸۲ به دست آمده است. علاوه بر آن، توزیع نشان داده شده دارای چولگی رو به چپ است. با مقداری کنکاش و دقت چنین دریافت می شود که مجموعه داده های به دست آمده به منظور شبیه سازی منحنی های رخنه صحرائی تا حدود زیادی متفاوت تر از روند سیلاب بوده و با ملاک قرار دادن دقت در بازسازی منحنی های صحرائی، می توان گفت که با استخراج سری های یکتا از پارامترهای مورد بحث برای برای هر بازه و انتقال زمانی آن می توان به بازسازی مطلوب انتقال آلاینده با این روش امیدوار بود.

به منظور تدقیق بیشتر در حساسیت مدل مورد بحث نسبت به پارامترهای خود، با ثابت نگه داشتن دو پارامتر اقدام به تغییر پارامتر باقی مانده گردید

و تغییرات غلظت آلاینده خروجی محاسبه شد. نتایج این محاسبات در بخش های الف تا پ شکل ۵ مورد نمایش قرار گرفته است. در قسمت الف این شکل، تاثیر تغییرات توان مدل ماسکینگام ( $m$ ) در غلظت آلاینده مورد نمایش قرار گرفته است. پرواضح است که افزایش توان مدل به مقادیر بیشتر از ۱ باعث افزایش مقادیر غلظت می شود. به بیان دیگر می توان اشاره نمود که افزایش این پارامتر می تواند باعث افزایش جرم آلاینده از منحنی رخنه خروجی از بازه رودخانه گردد که مخالف فیزیک مسئله می باشد و صرفاً در مواقعی قابل توجیه است که در ترکیب با دو پارامتر دیگر ( $k$  و  $x$ )، اثر افزایش جرم آن از بین رفته و ضریب بازبایی جرم آلاینده حوالی عدد یک نوسان نماید. استفاده از اعداد مابین صفر و یک نیز باعث کاهش ابعاد منحنی غلظت-زمان شده و در ابتدای منحنی روندیابی شده گاهاً مقادیر منفی تولید می نماید. در بخش ب شکل ۵ نیز با ثابت نگه داشتن ضرایب ( $k$  و  $m$ )، مقدار ضریب وزنی  $x$  حوالی مقدار دقیق محاسبه شده برای منحنی مزبور (۰/۲۵) نوسان داده شد. افزایش مقدار آن باعث شد که منحنی رخنه به حالت دو بخشی تقسیم شده و در بخش اول مقادیر منفی برای غلظت تولید گردد. البته نرخ این افزایش برای ضرایب وزنی بزرگ تر، بیشتر است. استفاده کردن از مقادیر منفی برای این ضریب نیز باعث رخداد زودتر غلظت اوج منحنی رخنه شده و در منحنی استخراج شده چولگی سمت راست ایجاد می شود. در بخش پ این شکل نیز تاثیر تغییرات پارامتر زمانی  $k$  در فرم منحنی های غلظت-زمان مورد بررسی قرار گرفته است مشاهده می گردد که برخلاف روند مشاهده شده در پارامترهای پیشین، افزایش پارامتر  $k$  اثر معکوس بر روی غلظت محاسباتی داشته و با کاهش آن نیز ابعاد منحنی بزرگ تر می گردند. فرم عمومی منحنی های رخنه محاسباتی به صورت تغییرات مشاهداتی ضریب توانی مدل است ولی با اثر معکوس. با دقت و کنکاش بیشتر در این خصوص می توان اذعان داشت که در میان پارامترهای سه گانه مدل ماسکینگام، بیشترین حساسیت به ترتیب نسبت به پارامترهای  $m$ ،  $k$  و  $x$  وجود دارد. البته همان طوری که پیش تر اشاره گردید پارامترهای  $m$  و  $x$  اثر مستقیم داشته و پارامتر  $k$  اثر معکوس دارد.

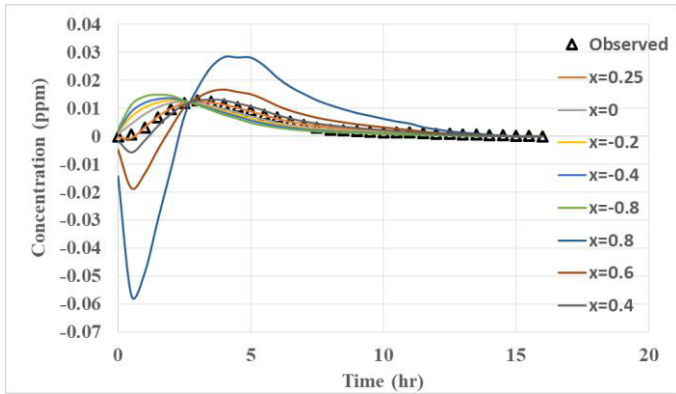
با تکیه به منحنی های رخنه صحرائی برداشت شده در دو رودخانه مورد مطالعه، در شکل ۶ تعدادی از پارامترهای انتقال آلاینده در مقابل پارامترهای هیدرولیکی نمایش داده شده است. در بخش الف این شکل عدد پکلت در مقابل فاصله از نقطه تزریق ترسیم گردیده است که روند افزایشی از خود نشان می دهد و مبین نرخ کمتر افزایش ضریب پخشیدگی طولی نسبت به طول رودخانه می باشد. شکل منحنی های غلظت-زمان در داده های برداشتی



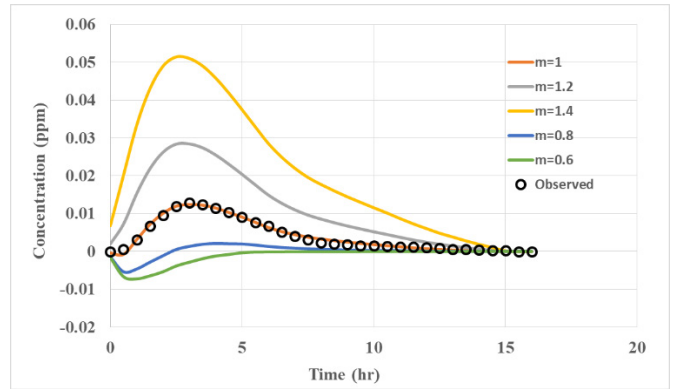


شکل ۴. نحوه توزیع پارامترهای مدل غیرخطی ماسکینگام و توزیع نرمال برازش داده شده بر روی آن ها (الف): مقادیر مربوط به توان  $m$ ، (ب) مقادیر مربوط به پارامتر زمانی  $k$ ، (پ) مقادیر مربوط به ضریب وزنی  $x$

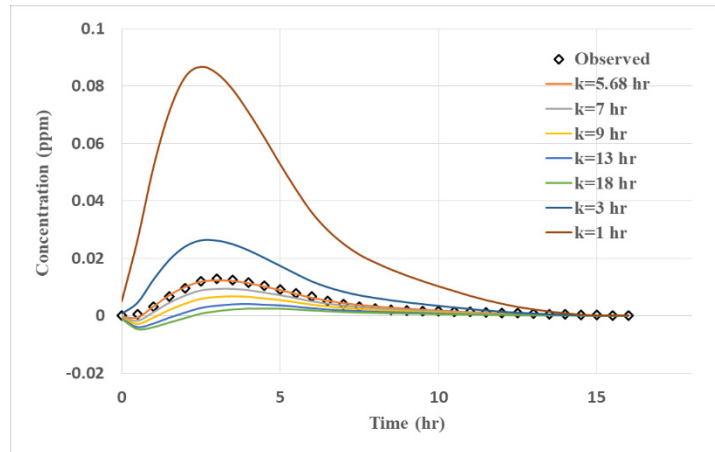
Fig. 4. Extracted Muskingham nonlinear model parameters and the normal distribution fitted to them (a) Power values (b) Time parameter values (c) Weight values



(ب)



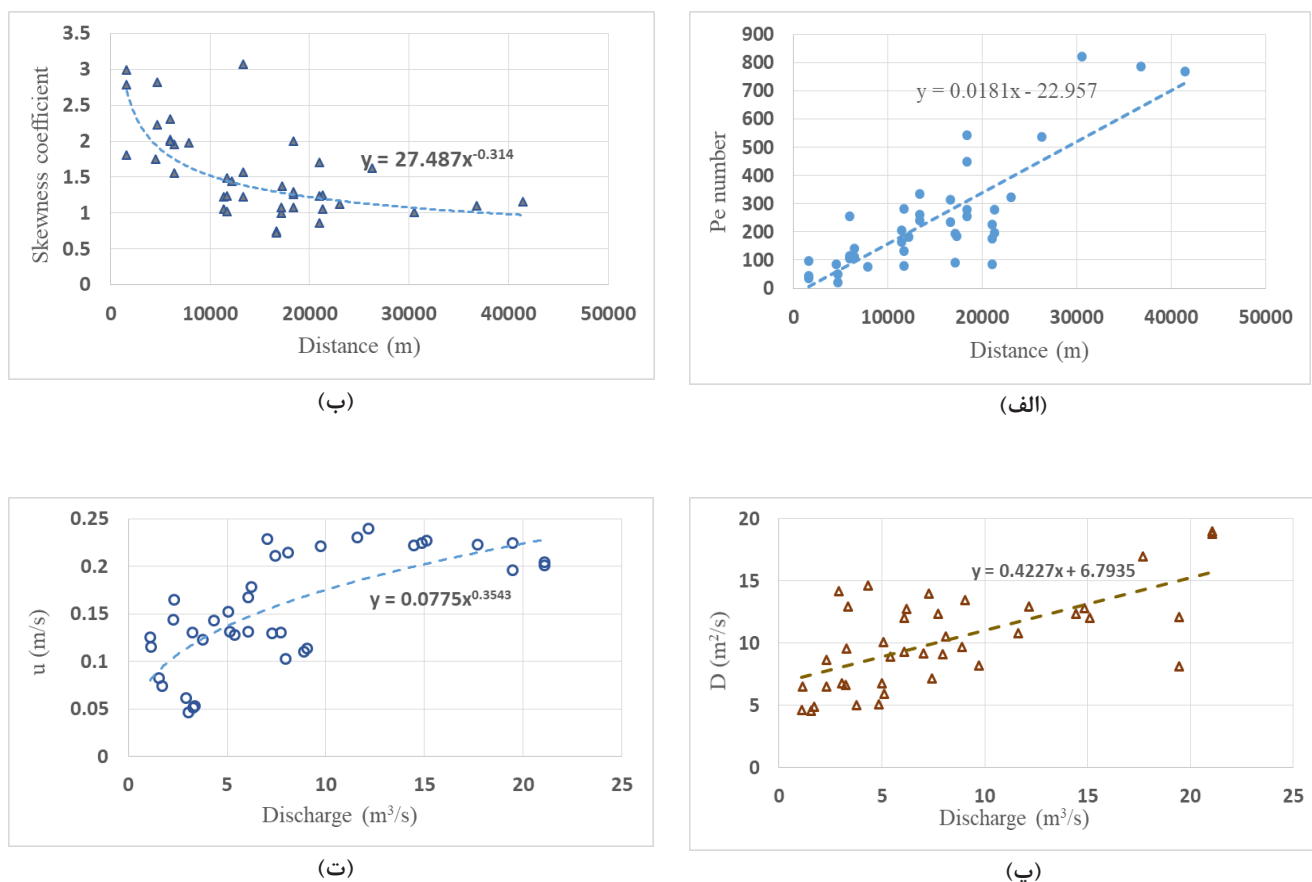
(الف)



(پ)

شکل ۵. (الف) تغییرات ایجاد شده در فرم منحنی رخنه با نوسان پارامتر توانی مدل ماسکینگام، (ب) تغییرات ایجاد شده در فرم منحنی رخنه با نوسان پارامتر ضریب وزنی مدل ماسکینگام، (پ) تغییرات ایجاد شده در فرم منحنی رخنه با نوسان پارامتر زمانی مدل ماسکینگام

**Fig. 5. (a) Changes in the form of the breakthrough curve with the variation of the power parameter of the Muskingum model, (b) Changes in the form of the breakthrough curve with the variation of the weighting parameter of the Muskingum model, (c) Changes in the form of the breakthrough curve with the variation of Muskingum's temporal parameter**



شکل ۶. (الف) تغییرات عدد پکلت در مقابل فاصله، (ب) تغییرات ضریب چولگی در مقابل فاصله، (پ) تغییرات ضریب انتشار طولی در مقابل دبی، (ت) تغییرات دبی در مقابل سرعت جریان متوسط

Fig. 6.

پخشیدگی بیشتر کمک نماید. از جمله فاکتورهای تشدید کننده این مکانیزم در رودخانه‌ها می‌توان به ایجاد تلاطم بیشتر و در نتیجه اختلاط قوی‌تر تحت تاثیر افزایش دبی و سرعت در مجاری رودخانه‌ها اشاره نمود. البته در صورت خروج جریان از مجرای اصلی و ورود آن به سیلاب‌دشت‌ها مباحث حالت دیگری به خود می‌گیرند که موضوع بحث حاضر نیست ولی در یک مجرای ثابت می‌توان گفت که با افزایش دبی ضریب پخشیدگی طولی نیز می‌تواند افزایش یابد (شکل‌های ۶-پ و ت).

از رودخانه‌ها با حرکت به سمت پایین‌دست دارای توزیع یکنواخت‌تری در هر دو بخش بالا و پایین‌رونده آن است. نتیجه مشخصه این امر می‌تواند در ضریب چولگی (شکل ۶-ب) مشخص‌تر باشد. با دقت در این منحنی مشخص می‌شود که این ضریب با حرکت به پایین‌دست رودخانه‌ها کاهش پیدا نموده و در نهایت به عدد ۱ محدود می‌گردد. دقت در مکانیزم پخشیدگی آلاینده‌ها در بخش‌های مختلف مشخص می‌نماید که هر فاکتوری که باعث ایجاد گرادیان سرعت مابین بخش‌های مختلف جریان گردد می‌تواند به

- [6] J. Yoon, G. Padmanabhan, Parameter estimation of linear and nonlinear Muskingum models, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 119(5) (1993) 600-610.
- [7] S. Mohan, Parameter estimation of nonlinear Muskingum models using genetic algorithm, *Journal of hydraulic engineering*, 123(2) (1997) 137-142.
- [8] J.H. Kim, Z.W. Geem, E.S. Kim, Parameter estimation of the nonlinear muskingum model using harmony search 1, *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 37(5) (2001) 1131-1138.
- [9] A. Das, Parameter estimation for Muskingum models, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 130(2) (2004) 140-147.
- [10] A. Das, Chance-constrained optimization-based parameter estimation for Muskingum models, *Journal of irrigation and drainage engineering*, 133(5) (2007) 487-494.
- [11] H.-J. Chu, L.-C. Chang, Applying particle swarm optimization to parameter estimation of the nonlinear Muskingum model, *Journal of Hydrologic Engineering*, 14(9) (2009) 1024-1027.
- [12] J. Luo, J. Xie, Parameter estimation for nonlinear Muskingum model based on immune clonal selection algorithm, *Journal of Hydrologic Engineering*, 15(10) (2010) 844-851.
- [13] Z.W. Geem, J.H. Kim, G.V. Loganathan, A new heuristic optimization algorithm: harmony search, simulation, 76(2) (2001) 60-68.
- [14] S.M. Easa, Closure to "Improved Nonlinear Muskingum Model with Variable Exponent Parameter" by Said M. Easa, December 2013, Vol. 18, No. 12, pp. 1790-1794.
- [15] M. Niazkar, S.H. Afzali, Streamline performance of Excel in stepwise implementation of numerical solutions, *Computer Applications in Engineering Education*, 24(4) (2016) 555-566.
- [16] J. Chabokpour, A. Samadi, M. Merikhi, Application of method of temporal moments to the contaminant exit breakthrough curves from rockfill media, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 49(3) (2018) 629-640. (In

#### ۴- نتیجه گیری

در این پژوهش از روش هیدرولوژیکی ماسکینگام غیرخطی که در روندیابی سیلاب در بازه‌های رودخانه‌ای استفاده می‌شود به منظور ردیابی منحنی‌های غلظت-زمان آلاینده‌ها در بازه‌های رودخانه‌ای استفاده گردید. نتایج امر مبین امر مطلب است که به دلیل شباهت شکل منحنی‌های رخنه آلاینده‌ها به هیدروگراف‌های سیلاب ورودی و خروجی، این مدل با استخراج ضرایب سه‌گانه آن قابلیت بازسازی مناسب ابعاد منحنی‌های رخنه را داشته ولی این مدل در شبیه‌سازی فاز انتقال آلاینده با سرعت عمومی جریان دارای مشکلاتی است لذا منحنی استخراج شده می‌بایستی به اندازه  $(\frac{L}{u})$  در روی محور زمانی انتقال داده شود تا هم خوانی دقیقی مابین منحنی‌های غلظت-زمان مشاهداتی و محاسباتی حاصل گردد. پارامترهای سه‌گانه محاسبه شده در این پژوهش مشخص نمود که برخلاف آنچه در روندیابی سیلاب وجود دارد، محدوده پارامترهای استخراج شده برای روندیابی آلاینده‌ها متفاوت‌تر است. آنالیز حساسیت انجام شده بر روی پارامترهای مدل غیرخطی ماسکینگام نیز نشان داد که پارامترهای  $m$ ،  $k$  و  $x$  به ترتیب بیشترین تا کمترین تاثیر را در بازسازی منحنی‌های غلظت-زمان دارند. علاوه بر این پارامترهای  $m$  و  $x$  اثر افزایشی در میزان غلظت داشته ولی پارامتر  $k$  اثر کاهنده غلظت دارد. در این پژوهش محدوده‌های مختلف پارامترهای مدل نیز استخراج شده که می‌تواند در تخمین‌های کاربردی دیگر به منظور پیش‌بینی غلظت آلاینده‌ها در بازه‌های رودخانه‌ای مورد استفاده قرار گیرد.

#### منابع

- [1] [1] E.M. Wilson, *Engineering hydrology*, Macmillan International Higher Education, 1990.
- [2] H.M. Samani, S. Jebelifard, Design of circular urban storm sewer systems using multilinear Muskingum flow routing method, *Journal of Hydraulic Engineering*, 129(11) (2003) 832-838.
- [3] G. McCarthy, *The unit hydrograph and flood routing*, Conference of North Atlantic Division, US Army Corps of Engineers, New London, CT. US Engineering, (1938).
- [4] M.A. Gill, Flood routing by the Muskingum method, *Journal of hydrology*, 36(3-4) (1978) 353-363.
- [5] Y.-K. Tung, River flood routing by nonlinear Muskingum method, *Journal of hydraulic engineering*, 111(12) (1985) 1447-1460.

- [24] M. Khorashadizadeh, S.A. Hashemimonfared, A. Akbarpour, M. Pourreza-bilondi, Uncertainty assessment of pollution transport model using GLUE method, Iranian Journal of Irrigation & Drainage, 10(3) (2016) 284-293. (In Persian)
- [25] D. Barry, K. Bajracharya, On the Muskingum-Cunge flood routing method, Environment International, 21(5) (1995) 485-490.
- [26] A.D. Koussis, Assessment and review of the hydraulics of storage flood routing 70 years after the presentation of the Muskingum method, Hydrological sciences journal, 54(1) (2009) 43-61.
- [27] X.N. Zhang, Y. Shang, L. Wang, Y.B. Song, R.P. Han, Y.Q. Li, Comparison of linear and nonlinear regressive analysis in estimating the Thomas model parameters for anionic dye adsorption onto CPB modified peanut husk in fixed-bed column, in: Advanced Materials Research, Trans Tech Publ, 2013, pp. 2179-2183.
- [28] A.D. Koussis, K. Mazi, Reverse flood and pollution routing with the lag-and-route model, Hydrological Sciences Journal, 61(10) (2016) 1952-1966.
- [29] H. Norouzi, J. Bazargan, Efficiency of the Linear Muskingum Method in Flood Routing of Dual Rockfill Detention Dams, Iranian journal of Ecohydrology, 7(4) (2020) 1061-1070. (In Persian)
- [30] M. Nasrabadi, A.M. Mazdeh, M.H. Omid, Experimental and Numerical Investigation of Effect of Cadmium Sorption by River Sediments on Longitudinal Dispersion, (2021). (In Persian)
- [17] D.V. Chapman, Water quality assessments: a guide to the use of biota, sediments and water in environmental monitoring, CRC Press, 1996.
- [18] J. Chabokpour, Application of hybrid cells in series model in the pollution transport through layered material, Pollution, 5(3) (2019) 473-486.
- [19] A.K. Sriwastava, S. Tait, A. Schellart, S. Kroll, M.V. Dorpe, J.V. Assel, J. Shucksmith, Quantifying uncertainty in simulation of sewer overflow volume, Journal of Environmental Engineering, 144(7) (2018) 04018050.
- [20] J.C. Refsgaard, J.P. van der Sluijs, A.L. Højberg, P.A. Vanrolleghem, Uncertainty in the environmental modelling process—a framework and guidance, Environmental modelling & software, 22(11) (2007) 1543-1556.
- [21] T. Bai, J. Wei, W. Yang, Q. Huang, Multi-Objective Parameter Estimation of Improved Muskingum Model by Wolf Pack Algorithm and Its Application in Upper Hanjiang River, China, Water, 10(10) (2018) 1415.
- [22] S. Farzin, V.P. Singh, H. Karami, N. Farahani, M. Ehteram, O. Kisi, M.F. Allawi, N.S. Mohd, A. El-Shafie, Flood routing in river reaches using a three-parameter Muskingum model coupled with an improved bat algorithm, Water, 10(9) (2018) 1130.
- [23] G. Tayfur, V.P. Singh, T. Moramarco, S. Barbetta, Flood hydrograph prediction using machine learning methods, Water, 10(8) (2018) 968.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

J. Chabokpour, Operation of the non-linear Muskingum model in the prediction of the pollution breakthrough curves through the river reaches, Amirkabir J. Civil Eng., 54(1) (2022) 21-34.

DOI: 10.22060/ceej.2021.17413.6556





