

## Technical Note

Prediction of Floods Extent with Different  
Return Periods Using 2-D Hydraulic Model,  
LISFLOOD-FPM. Ozhan<sup>1\*</sup>, A. Bahreman<sup>2</sup>, V. Sheikh<sup>2</sup>  
and Ch. Komaki<sup>3</sup>

## Abstract

Hydraulic models are the primary tools used to plan and develop structural and non-structural flood mitigation and management solutions. Such tools are used to simulate probable inundation damage on a given area depending on several flood scenarios with different intensity, duration and return period. Raster-based models have recently gained credence in the modelling of floodplain inundation and flood hydraulics. In this paper the 2D hydraulic model, LISFLOOD-FP, was applied to a 7 km reach of the Chehlchay River in Golestan province to predict flood extents with different return periods. The model was calibrated for a flood event in 2011 using floodplain and channel friction parameters against observed inundation extent as determined from satellite (Google Earth) images. The friction parameters were found through a calibration procedure where a measure of fit between predicted and observed extent is maximized. Model validation was performed using a distinct flood event in 2016. The measure of fit (F) was obtained in the calibration and validation process as %71 and %78, respectively. Finally, the calibrated model was used to predict floods with different return periods.

**Keywords:** 2-D Hydraulic Model, LISFLOOD-FP, Flood Extent Prediction.

Received: January 30, 2017

Accepted: June 14, 2017

## یادداشت فنی

پیش‌بینی پهنه سیلاب‌های با دوره بازگشت مختلف با  
استفاده از مدل هیدرولیکی دو بعدی LISFLOOD-FPمحمد اوژن<sup>۱\*</sup>، عبدالرضا بهره‌مند<sup>۲</sup>، واحد بردی شیخ<sup>۲</sup>  
و چوقی بایرام کمکی<sup>۳</sup>

## چکیده

مدل‌های هیدرولیکی ابزارهای اولیه‌ای هستند که برای برنامه‌ریزی و توسعه روش‌های سازه‌ای و غیرسازه‌ای مدیریت و کاهش سیل استفاده می‌شوند. هدف چنین ابزارهایی شبیه‌سازی خسارت طغیان سیل در یک منطقه معین بسته به چندین سناریو سیل با شدت، مدت و دوره بازگشت مختلف است. مدل‌های هیدرولیکی مبتنی بر رستر اخیراً در مدل‌سازی تعیین پهنه سیلابی و هیدرولیک سیل مورد توجه قرار گرفته‌اند. در این مقاله مدل هیدرولیکی دوبعدی LISFLOOD-FP، به منظور پیش‌بینی پهنه سیلاب‌های با دوره بازگشت مختلف در بازه‌ای بطول ۷ کیلومتر از رودخانه چهل چای در استان گلستان به کار گرفته شد. مدل بر اساس واقعه سیل ۲۶ اسفند ۱۳۹۰ با دبی پیک ۱۰۳ مترمکعب بر ثانیه با استفاده از پارامترهای ضریب زبری کانال و دشت سیلابی در مقابل پهنه سیل مشاهده‌ای به دست آمده از تصاویر ماهواره‌ای واسنجی شد. پارامترهای ضریب زبری بواسطه فرآیند واسنجی برآورد شدند بطوریکه شاخص تطابق (F) بین پهنه مشاهده‌ای و پیش‌بینی شده حداکثر شود. اعتبارسنجی مدل با استفاده از واقعه سیل ۲۹ فروردین ۱۳۹۵ با دبی پیک ۱۵۵ مترمکعب بر ثانیه صورت گرفت. شاخص تطابق (F) در مرحله واسنجی ۷۱ درصد و در مرحله اعتبارسنجی ۷۸ درصد بدست آمد. در نهایت مدل واسنجی شده برای پیش‌بینی سیل‌های با دوره بازگشت مختلف استفاده شد.

**کلمات کلیدی:** مدل هیدرولیکی دو بعدی، LISFLOOD-FP، پیش‌بینی پهنه سیل.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۵/۱۱/۱۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۶/۳/۲۴

1- PhD. Candidate of Watershed Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran  
Email: ozhanmohammad@gmail.com

2- Associate Professor, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

3- Assistant Professor, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

\*- Corresponding Author

۱- دانشجوی دکتری مهندسی آبخیزداری دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

۲- دانشیار دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

۳- استادیار دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

\*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان خرداد ۱۳۹۷ امکانپذیر است.

Bates and De Roo (2000). (al., 2010; Wood et al., 2016) مدل LISFLOOD-FP را برای یک بازه ۳۵ کیلومتری از رودخانه میوز در هلند برای شبیه‌سازی یک واقعه سیل بزرگ که در ژانویه ۱۹۹۵ رخ داد بکار گرفتند. این واقعه بر اساس داده‌های موجود و عکس هوایی برای پهنه طغیان سیل انتخاب شد تا امکان اعتبارسنجی مناسب مدل فراهم شود. مدل‌های رقومی ارتفاعی با وضوح ۱۰۰، ۵۰ و ۲۵ متر تهیه گردید. مدل توسعه یافته با بهترین برازش شبیه‌سازی بطور صحیح ۸۱/۹ درصد مناطق غرقاب شده را پیش‌بینی کرد. بطور کلی کاربرد مدل LISFLOOD-FP در مطالعات مختلف کارایی مناسب آن را در پیش‌بینی پهنه‌های سیلابی نشان می‌دهد (Amarnath et al., 2015). در این مقاله هدف تهیه پهنه سیلاب-های با دوره بازگشت‌های مختلف در یک بازه‌ای بطول ۷ کیلومتر از رودخانه چهل‌چای با استفاده مدل هیدرولیکی دو بعدی LISFLOOD-FP می‌باشد.

## ۲- روش تحقیق

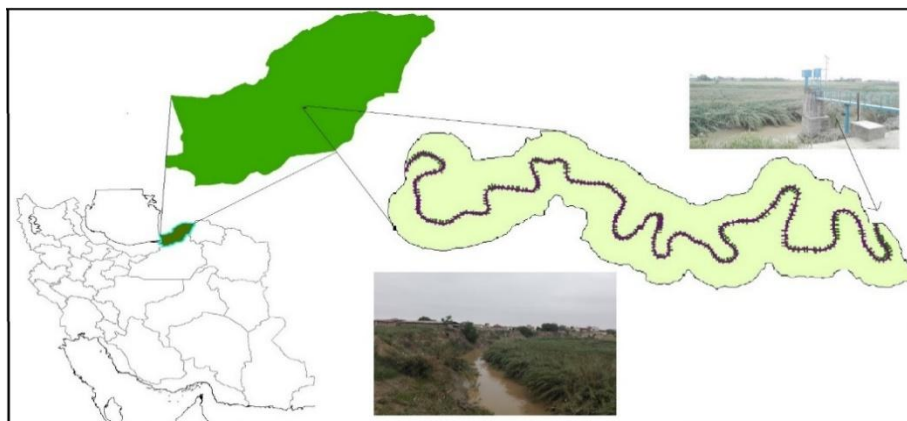
مطالعه حاضر بر روی بازه‌ای به طول ۷ کیلومتر از رودخانه چهل‌چای نزدیک شهر گنبد گاوس در استان گلستان انجام شد که در حوزه آبخیز گرگانود قرار دارد (شکل ۱). بازه مورد مطالعه در یک منطقه دشتی با شیب بسیار کم (۰/۰۰۰۷) واقع شده است. عرض متوسط مقطع رودخانه حدود ۳۰ متر است و دشت سیلابی آن عمدتاً دارای کاربری کشاورزی (گندم‌زار) است. ضمناً، از داده‌های ایستگاه هیدرومتری ارازکوسه که در ابتدای بازه مورد مطالعه قرار دارد جهت تعیین شرایط مرزی بالادست مدل استفاده گردید.

### ۱-۲- توصیف مدل LISFLOOD-FP

LISFLOOD-FP یک مدل شبیه‌سازی طغیان سیل مبتنی بر رستر است که بویژه بخاطر مزیت استفاده از داده‌های توپوگرافی با تفکیک بالا توسعه یافته است. مدل شامل تعدادی راه‌حل عددی است که انتشار موج سیل را در طول کانال و عبور آن به دشت سیلابی با استفاده از ساده‌سازی معادلات آب کم‌عمق شبیه‌سازی می‌کند. انتخاب راه‌حل عددی به خصوصیتی از سیستم مدل‌سازی شده، زمان مود نیاز برای اجرا و داده‌های در دسترس بستگی دارد. مدل، عمق آب و دبی را برای هر گام زمانی و هر سلول بر مبنای شبکه رستری استفاده شده محاسبه می‌کند. جریان کانال از یک روش یک بعدی استفاده می‌کند که قادر است انتشار موج سیل به پایین دست و پاسخ به شیب سطح آزاد را به کنترل درآورد، که می‌تواند از طریق معادلات پیوستگی و مونتوم توصیف گردد. شرایط مرزی بوسیله یک جریان اعمال شده در بالادست بازه و یک ارتفاع آب اعمال شده در پایین دست فراهم می‌شود.

سیلاب‌ها، بلایای طبیعی پرهزینه‌ای هستند که باعث مرگ و میر، خسارات مالی و خسارات به خطوط ارتباطی، حمل و نقل و زیرساخت‌های حیاتی می‌شوند. ۴۰ درصد همه بلایای طبیعی در سرتاسر جهان و نیمی از مرگ‌ومیر ناشی از بلایای طبیعی مربوط به سیلاب‌ها هستند (Baldassarre et al., 2010). همچنین، پیش‌بینی تغییر اقلیم نشان می‌دهد که در آینده ممکن است فراوانی سیلاب‌ها افزایش یابد. در پاسخ به این بلای جهانی، تقاضا برای پیش‌بینی‌های بهتر سیل افزایش یافته است (Wood et al., 2016). مدل‌های هیدرولیکی ابزارهای اولیه‌ای هستند که برای برنامه‌ریزی و توسعه روش‌های سازه‌ای و غیرسازه‌ای مدیریت و کاهش سیل استفاده می‌شوند (Kalyanapu et al., 2010). مدل‌سازی دو بعدی پهنه سیل گیر جزء محوری ارزیابی و مدیریت خطر سیل به شمار می‌رود. بنابراین، جای تعجب نیست که در طول دهه‌های گذشته تلاش قابل ملاحظه‌ای به منظور توسعه الگوریتم‌هایی با پیچیدگی فزاینده جهت شبیه‌سازی جریان آب در رودخانه‌ها و دشت‌های سیلابی صورت گرفته است (Almeida et al., 2012). مدل‌های هیدرولیکی مبتنی بر رستر اخیراً در مدل‌سازی تعیین پهنه سیلابی و هیدرولیک سیل مورد توجه قرار گرفته‌اند. از مزایای مدل‌های مبتنی بر رستر، سادگی فرمولاسیون، کارایی محاسباتی و سادگی استفاده از آنها است که یک مزیت قابل توجه برای به‌کارگیری و ارزیابی آینده آنها به شمار می‌رود. کارایی محاسباتی چنین مدل‌هایی بدین معناست که می‌توانند در تفکیک مکانی بالاتری نسبت به تکنیک‌های محاسباتی پیچیده‌تر همچون روش جزء محدود به کار برده شوند (Horritt and Bates, 2001). مدل هیدرولیکی LISFLOOD-FP یک مدل دو بعدی مبتنی بر رستر برای جریان زیربحرانی است که معادلات آب کم عمق را با استفاده از روش تفاضل محدود بر روی یک شبکه حل می‌کند (Wood et al., 2016). این مدل بر پایه مدل‌های رقومی ارتفاع رستری با وضوح بالا طراحی شده است، که بطور چشمگیری برای بسیاری از دشت‌های سیلابی رودخانه‌ها در دسترس هستند. این مدل شامل یک تقریب موج سینماتیک یک بعدی برای جریان کانال است که با استفاده از یک روش تفاضل محدود حل می‌شود و یک نمایش دیفیوژن دو بعدی از جریان دشت سیلابی است (Bates and De Roo, 2000).

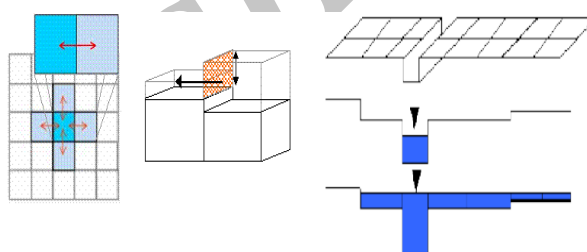
مطالعات زیادی در رابطه با به‌کارگیری مدل هیدرولیکی دو بعدی LISFLOOD-FP جهت شبیه‌سازی جریان سیل و تهیه نقشه‌های پهنه سیل صورت گرفته است (Horritt and Bates, 2001, 2002; Hunter et al., 2005; Thielen et al., 2009; Baldassarre et



**Fig. 1- Location of the study area**  
 شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه

از ضریب زبری مانینگ ( $n$ ) برای هر سلول در شبکه رستری تهیه نمود که باید از نظر ابعاد و اندازه سلول مشابه نقشه DEM باشد.

**ج) مشخصات رودخانه:** فایل مشخصات رودخانه شامل تهیه مقاطع مختلفی است که تعداد آنها بستگی به تغییرات خصوصیات رودخانه در طول بازه دارد و باید مشخصات، ضریب زبری مانینگ، عرض و ارتفاع بستر مربوط به هر مقطع تعیین گردد.



**Fig. 2- The inter-cell flow mechanism in the LISFLOOD-FP model**  
 شکل ۲- نحوه جریان بین دو سلول در مدل LISFLOOD-FP

**د) تعریف شرایط مرزی برای اجرای مدل:** شرایط مرزی بالادست بازه مورد مطالعه بصورت هیدروگراف جریان ورودی یا دبی با مقدار ثابت تعریف می‌شود. شرایط مرزی پایین دست در صورت وجود ایستگاه اندازه‌گیری می‌تواند بر اساس تراز آب پایین دست یا هیدروگراف خروجی در انتهای بازه تعریف شود و در غیر این صورت می‌توان بر مبنای فرض محاسبه عمق نرمال و تعیین شیب سراسری بازه تعیین گردد.

### ۲-۳- خروجی‌های مدل

مهمترین خروجی‌های مدل عبارتند از: ۱- فایل بیلان جرم که در برگرفته مساحت غرقاب شده است و همچنین عمق آب و دبی خروجی را در پایاب محدوده مدل در فاصله زمانی مشخص شده توسط کاربر نشان می‌دهد؛ ۲- عمق آب و ارتفاع سطح آب برای هر پیکسل در فاصله زمانی مشخص شده توسط کاربر بصورت شبکه رستری؛ ۳- حداکثر ارتفاع سطح آب و حداکثر عمق آب پیش‌بینی شده توسط مدل برای هر پیکسل در طول دوره شبیه‌سازی بصورت شبکه رستری؛ ۴- پروفیل سطح آب کانال در فاصله زمانی مشخص توسط کاربر.

جریان‌های دشت سیلابی که بطور مشابه از طریق معادلات پیوستگی و مونتوم توصیف می‌شوند، بصورت یک شبکه از سلول‌های مربعی گسسته می‌شوند که اجازه می‌دهد مدل، جریان دینامیک دو بعدی را روی دشت سیلابی نمایش دهد (شکل ۲). فرض می‌شود که جریان بین دو سلول بطور ساده تابعی از اختلاف ارتفاع سطح آزاد بین آن دو سلول است.

### ۲-۲- ورودی‌های مورد نیاز برای اجرای مدل

**الف) مدل رقومی ارتفاع محدوده مورد مطالعه:** که باید دارای اندازه سلولی و دقت مناسب باشد تا بتواند تغییرات ارتفاعی و عوارض مختلف کانال اصلی و دشت سیلابی را بخوبی نمایش دهد و مساحت مناسبی از دشت سیلابی را که احتمال سیل‌گیری آن وجود دارد را شامل گردد.

**ب) نقشه ضریب زبری دشت سیلابی:** در صورتی که دشت سیلابی از نظر ضریب زبری یکنواخت نباشد، می‌توان نقشه تغییرات مکانی ضریب زبری را در سراسر دشت سیلابی با تخصیص مقادیری

## ۴-۲- محاسبه دبی‌های با دوره بازگشت مختلف

برای محاسبه دبی‌های با دوره بازگشت مختلف، دبی‌های حداکثر لحظه‌ای سالانه یک دوره آماری ۵۰ ساله (سال آبی ۴۵-۴۴ تا ۹۴-۹۳) مربوط به ایستگاه هیدرومتری اراز کوسه واقع در ابتدای بازه مورد مطالعه مورد استفاده قرار گرفت. با استفاده از برنامه SMADA، توزیع های آماری مختلف مقایسه گردید و بر اساس آزمون کای اسکوار توزیع آماری لوگ پیرسون نوع ۳، بهترین برازش را برای محاسبه دبی‌های با دوره بازگشت مختلف ۲، ۵، ۱۰، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ سال نشان داد.

## ۵-۲- ارزیابی مدل

ارزیابی مدل بر اساس شاخص تطابق نقشه‌ها (F) صورت گرفت (معادله ۱).

$$F = \frac{\text{Num}(S_{\text{mod}} \cap S_{\text{obs}})}{\text{Num}(S_{\text{mod}} \cup S_{\text{obs}})} \quad (1)$$

که در آن F شاخص تطابق نقشه‌ها،  $S_{\text{obs}}$  مساحت (تعداد سلول یا پیکسل) پهنه سیل مشاهده‌ای و  $S_{\text{mod}}$  مساحت (تعداد سلول یا پیکسل) پهنه سیل شبیه‌سازی شده با مدل است. مقدار F بین صفر تا ۱۰۰ تغییر می‌کند. مقدار صفر برای زمانی که بین سطح غرقابی مشاهده‌ای و پیش‌بینی شده توسط مدل هیچ همپوشانی وجود نداشته باشد و مقدار ۱۰۰ تطابق کامل سطح غرقابی مشاهده‌ای و پیش‌بینی شده را نشان می‌دهد.

## ۳- نتایج و تحلیل

پس از تهیه فایل‌ها و داده‌های ورودی، ابتدا مدل بر اساس یک واقعه سیل ثبت شده در ایستگاه هیدرومتری اراز کوسه که در ابتدای بازه مورد مطالعه قرار دارد اجرا شد. واقعه مذکور دارای دبی پیک ۱۰۳ مترمکعب بر ثانیه است که مربوط به تاریخ ۲۶ اسفند سال ۱۳۹۰ می‌باشد. این واقعه بر اساس تصویر ماهواره‌ای پهنه سیل مشاهده‌ای که از گوگل ارث بدست آمده است، انتخاب گردید. در این تحقیق براساس روش چاو که یک روش مبتنی بر جداول تجربی است و با بازدید میدانی از بازه مورد مطالعه، برای کانال اصلی و دشت سیلابی به‌طور مجزا مقادیر اولیه ضریب زبری مانینگ تعیین گردید و سپس واسنجی مدل با تغییر ضریب زبری کانال و دشت سیلابی و مقایسه مساحت پهنه سیل شبیه‌سازی شده توسط مدل با مساحت پهنه سیل مشاهده‌ای براساس شاخص تطابق نقشه‌ها (F) صورت گرفت. بهترین برازش مدل، شاخص F برابر ۷۱ درصد را نشان داد. براساس نتایج واسنجی مدل، ضریب زبری کانال ( $n_{\text{ch}}$ ) و دشت سیلابی ( $n_{\text{fp}}$ ) به ترتیب ۰/۰۴۵ و ۰/۰۸ بدست آمد (جدول ۱). پس از واسنجی مدل، به منظور اعتبارسنجی آن از یک واقعه سیل مربوط به ۲۹ فروردین سال

۱۳۹۵ با دبی پیک ۱۵۵ مترمکعب بر ثانیه استفاده شد که یک هفته بعد از رخداد آن با توجه به داغاب سیل و اندازه‌گیری میدانی نسبت به تهیه نقشه پهنه سیل اقدام شد و با پهنه سیل شبیه‌سازی شده توسط مدل با پارامترهای ضریب زبری واسنجی شده مقایسه گردید که شاخص تطابق ۷۸ درصد را نشان داد. شکل ۳ و ۴، مقایسه پهنه سیل شبیه‌سازی شده با پهنه سیل مشاهده‌ای مربوط به دو واقعه سیل مورد مطالعه را در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی نشان می‌دهند.

Table1- Model calibration using  $n_{\text{ch}}$ ,  $n_{\text{fp}}$  and Fit index (F)

جدول ۱- واسنجی مدل بر اساس زبری کانال و دشت سیلابی و شاخص تطابق (F)

$(n_{\text{ch}})$	$(n_{\text{fp}})$					
	0.02	0.04	0.06	0.08	0.10	0.12
0.030	49	49	49	49	49	49
0.035	55	55	57	58	54	54
0.040	65	65	66	66	66	66
0.045	68	68	70	71	67	67
0.050	67	67	67	70	65	65

دبی‌های با دوره بازگشت مختلف در ایستگاه هیدرومتری اراز کوسه بر اساس توزیع آماری لوگ پیرسون نوع ۳ برای دوره بازگشت‌های ۲، ۵، ۱۰، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ برآورد گردید (جدول ۲). پس از برآورد دبی‌های با دوره بازگشت مختلف، بر اساس مدل واسنجی شده، اقدام به شبیه‌سازی پهنه سیل آنها گردید که نتایج مربوط به مساحت پهنه سیل شبیه‌سازی شده در جدول ۲ آمده است.

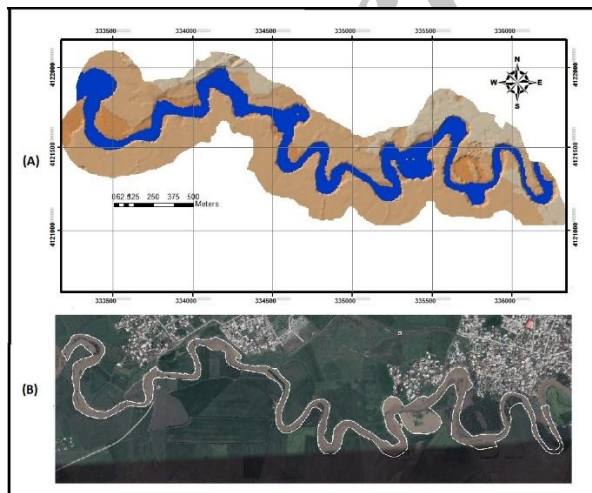


Fig. 3- Comparison between the simulated (A) and observed (B) inundated area at the calibration stage

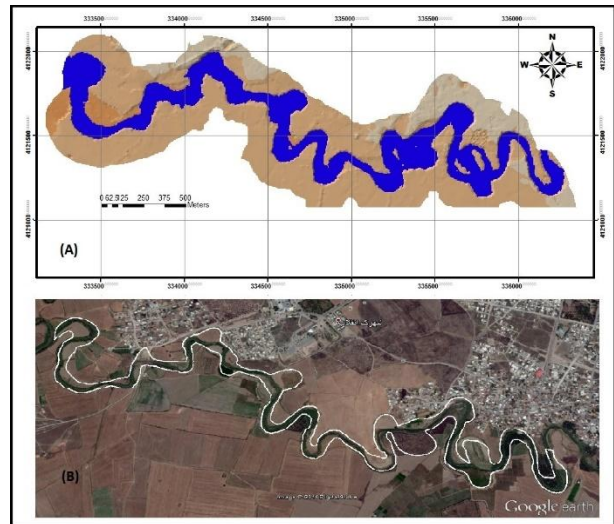
شکل ۳- مقایسه پهنه سیل شبیه‌سازی شده (A) و مشاهده‌ای (B) در مرحله واسنجی



مدل هیدرولیکی با اختصاص مقادیر مختلف ضریب زبری مانینگ در کانال و دشت سیلابی و براساس تابع هدف مقایسه پهنه سیل شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای صورت گرفت (جدول ۱) که نتایج واسنجی نشان داد که مدل حساسیت بیشتری به ضریب زبری کانال نسبت به ضریب زبری دشت سیلابی دارد که از این نظر با نتایج (2001) Horritt and Bates انطباق دارد.

#### ۴- خلاصه و جمع‌بندی

با توجه به خطاهای احتمالی مرتبط با تصویر ماهواره‌ای پهنه سیل و داده‌های مورد استفاده، درجه بالایی از عدم قطعیت، مشاهدات پهنه سیلابی را در بر می‌گیرد. کارهای مختلفی که بر روی واسنجی و اعتبارسنجی مدل‌های دو بعدی طغیان سیل رودخانه انجام شده است، عمدتاً محدود به واسنجی مدل در مقابل یک واقعه سیل منفرد است، از این رو تست محدودی از قدرت پیش‌بینی مدل به شمار می‌روند. برای ارزیابی دقیق‌تر کارایی مدل استفاده از روش واسنجی و اعتبارسنجی توأم نیاز است تا نقاط ضعف مدل بخوبی شناخته شود. اولویت‌های تحقیقی آینده می‌تواند پیشرفت در رابطه با اعتبارسنجی مدل با استفاده از داده‌های دقیق‌تر ایستگاه‌های هیدرومتری، تصاویر ماهواره‌ای و عکس‌های هوایی باشد. تکنیک اعتبارسنجی مدل با استفاده از داده‌های سنجش از دور باید بر روی بازه‌ها و وقایع دیگر با مجموعه داده‌های مناسب به کار گرفته شود، این امر اطمینان به پیش‌بینی‌های مدل را افزایش خواهد داد. در کارهای آینده می‌توان تأثیر تغییر در تفکیک‌پذیری شبکه رستری بر روی کارایی مدل را آزمایش کرد و با پیش‌بینی بدست آمده از سایر مدل‌های هیدرولیکی دو بعدی مقایسه نمود. به‌طور کلی مدل هیدرولیکی دو بعدی LISFLOOD-FP از نظر نصب و اجرا ساده و از نظر محاسباتی کارآمد است و می‌تواند به‌وسیله کاربران مختلف استفاده شود و به آسانی با سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) ترکیب گردد.



**Fig. 4- Comparison between the simulated (A) and observed (B) inundated area at the validation stage**  
**شکل ۴- مقایسه پهنه سیل شبیه‌سازی شده (A) و مشاهده‌ای (B) در مرحله اعتبارسنجی**

نتایج اعتبارسنجی مدل در پیش‌بینی پهنه سیل نشان داد که مدل کارایی مناسبی در شبیه‌سازی منطقه سیل‌گیر داراست، به‌طوریکه شاخص F برابر ۷۸ درصد را ارائه نمود و با نتایج به‌کارگیری مدل LISFLOOD-FP در بازه‌ای بطول ۶۰ کیلومتر توسط (Horritt and Bates (2002)، با شاخص کارایی ۷۳ درصد و در بازه‌ای بطول ۳۵ کیلومتر توسط Bates and De Roo (2000)، با شاخص کارایی ۸۲ درصد قابل مقایسه است. همچنین مقایسه مساحت پهنه سیلاب‌های با دوره بازگشت مختلف (جدول ۲) نشان می‌دهد که به‌طور طبیعی مساحت پهنه سیل‌گیر با افزایش دوره بازگشت افزایش می‌یابد بطوریکه مساحت پهنه سیل با دوره بازگشت ۲۰۰ ساله حدود سه برابر مساحت پهنه سیل با دوره بازگشت ۲ ساله است. واسنجی

**Table 2- Discharge with different return periods and the predicted inundated area**

**جدول ۲- دبی‌های با دوره بازگشت مختلف و مساحت پهنه پیش‌بینی شده سیل**

Return Period (Year)	2	5	10	25	50	100	200
Discharge (m <sup>3</sup> /s)	88	133	167	213	251	291	334
Predicted inundated area (Hec)	15.88	19.97	24.63	32.66	38.40	42.69	47.27
Maximum of predicted water stage (m)	30.41	31.17	31.81	32.56	33.04	33.37	33.80
Maximum of predicted water depth (m)	3.25	4.13	4.77	5.53	6.13	6.59	7.24

- Horritt M S, Bates P (2001) Effects of spatial resolution on a raster based model of flood flow. *Journal of Hydrology* 253(1):239-249
- Horritt M S, Bates P (2001) Predicting floodplain inundation: raster-based modelling versus the finite-element approach. *Hydrological processes* 15(5):825-842
- Horritt M S, Bates P (2002) Evaluation of 1D and 2D numerical models for predicting river flood inundation. *Journal of hydrology* 268(1):87-99
- Hunter N M, Bates P, Horritt M S, De Roo A P J, Werner M G (2005) Utility of different data types for calibrating flood inundation models within a GLUE framework. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 9(4):412-430
- Kalyanapu A J, Burian S J, McPherson T N (2010) Effect of land use-based surface roughness on hydrologic model output. *Journal of Spatial Hydrology* 9(2):51-71
- Thielen J, Bartholmes J, Ramos M H, Roo A D (2009) The European flood alert system—Part 1: concept and development. *Hydrology and Earth System Sciences* 13(2):125-140
- Wood M, Hostache R, Neal J, Wagener T, Giustarini L, Chini M, Bates P (2016) Calibration of channel depth and friction parameters in the LISFLOOD-FP hydraulic model using medium-resolution SAR data and identifiability techniques. *Hydrology and Earth System Sciences* 20(12):4983
- Almeida G A, Bates P, Freer J E, Souvignet M (2012) Improving the stability of a simple formulation of the shallow water equations for 2-D flood modeling. *Water Resources Research* 48(5):1-14
- Amarnath G, Umer Y M, Alahacoon N, Inada, Y (2015) Modelling the flood-risk extent using LISFLOOD-FP in a complex watershed (case study: Mundeni Aru River Basin, Sri Lanka). In: *Proc. IAHS*, 370:131-138
- Bates P, De Roo A P J (2000) A simple raster-based model for flood inundation simulation. *Journal of hydrology* 236(1):54-77
- Bates P D, Horritt M S, Fewtrell T J (2010) A simple inertial formulation of the shallow water equations for efficient two-dimensional flood inundation modelling. *Journal of Hydrology* 387(1):33-45
- De Roo A P, Gouweleeuw B, Thielen J, Bartholmes J, Bongiannini-Cerlini P, Todini E, Pappenberger F (2003) Development of a European flood forecasting system. *International Journal of River Basin Management* 1(1):49-59
- Di Baldassarre G, Schumann G, Bates P, Freer J E, Beven K J (2010) Flood-plain mapping: a critical discussion of deterministic and probabilistic approaches. *Hydrological Sciences Journal* 55(3):364-376