

## مدل‌سازی بارش-رواناب در حوضه ليقوان چای با استفاده از مدل اتومای سلولی

محمدتقی اعلمی\* - استاد دانشکده عمران، دانشگاه تبریز

لیلا ملکانی - دکترای عمران - آب، دانشگاه تبریز

محمدعلی قربانی - دانشیار دانشکده کشاورزی، گروه مهندسی آب، دانشگاه تبریز

پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۰۵/۱۲      تأیید نهایی: ۱۳۹۳/۱۱/۱۵

### چکیده

با توجه به اهمیت تخمین صحیح رواناب در مدیریت حوضه و طراحی سازه‌های آبی، از گذشته تا به امروز روش‌های مختلفی برای مدل‌سازی بارش-رواناب ارائه شده است که اتومای سلولی یکی از جدیدترین آن‌ها می‌باشد. در این روش چشم‌انداز حوضه با شبکه‌ای از سلول‌ها تعریف گردیده و اندرکنش بین سلول‌ها با استفاده از قوانین حاکم بر فیزیوگرافی حوضه منجر به مدل‌سازی رواناب می‌شود. این مدل به GIS و تصاویر ماهواره‌ای وابستگی دارد و از اطلاعات مختلف DEM، کاربری اراضی، گروه‌های هیدرولوژیک خاک، بارش، شیب و غیره استفاده می‌شود. در این تحقیق رواناب حوضه ليقوان چای در استان آذربایجان شرقی با استفاده از اتومای سلولی مدل‌سازی شده است. با توجه به سادگی، توانایی بالا، شیء-گرا بودن زبان پایتون و هماهنگی با محیط GIS برای برنامه‌نویسی به‌منظور پیاده‌سازی قوانین تخمین رواناب و گسترش آن بر اساس تکنیک اتومای سلولی از برنامه‌نویسی با زبان پایتون در GIS استفاده شده است. مقایسه نتایج با مقادیر مشاهداتی در دو ایستگاه هروی و ليقوان با استفاده از معیارهای کارایی ضریب همبستگی، نش-ساتکلیف و جذر میانگین مربعات خطا نشان می‌دهد که دقت نتایج مطلوب می‌باشد. مزیت اصلی این روش علاوه بر سادگی و استفاده از قوانین ارتباطی واقع‌گرایانه، کسب اطلاعات رواناب برای هر نقطه دلخواه از حوضه به‌غیر از خروجی حوضه است که در این تحقیق برای شش نقطه در درون حوضه سری زمانی سیلاب استخراج گردید. با توجه به آماده بودن برنامه می‌توان رواناب را برای شرایط مختلف زمانی و مکانی نیز به‌راحتی تخمین زد یعنی رواناب بلندمدت حوضه و یا ناشی از بارش‌های لحظه‌ای را شبیه‌سازی نمود.

واژگان کلیدی: مدل‌سازی بارش-رواناب، اتومای سلولی، GIS، ليقوان چای.

## ۱- مقدمه

جهت ارائه برنامه‌ریزی صحیح مدیریتی در سطح حوضه‌های آبریز دانستن اطلاعات رواناب نیاز اساسی مدیریت منابع آب و مسائل مهندسی آب می‌باشد. سیلاب‌ها عموماً در دره‌های خشک که داده‌های اندازه‌گیری شده ندارند رخ می‌دهند. در استان آذربایجان شرقی برای حوضه‌ی کوچک‌تر از ۴۰ کیلومتر مربع اطلاعات ایستگاه‌های هیدرومتری موجود نمی‌باشد. بنابراین توسعه روش‌های تخمین رواناب برای این حوضه‌ها ضروری است. علیرغم وجود روش‌های مختلف برای تخمین رواناب در حوضه‌های فاقد آمار، امروزه استفاده از GIS بیشتر مدنظر محققان است (پاتیل و همکاران، ۲۰۰۸، ۱۲۲۲). مدل‌های بسیاری نظیر *HEC GeoHMS MIKE FLOOD MIKE 11 AGNPS EPIC SWAT WMS* اتومای سلولی<sup>۱</sup> از جمله مدل‌هایی هستند که در تحقیقات مربوط به آب و محیط‌زیست تلفیق خوبی با GIS پیدا کرده‌اند (ژان و هوانگ، ۲۰۰۴، ۱؛ کاپ و نومن، ۲۰۰۸، ۳۸).

اتومای سلولی یک مدل ریاضی است که می‌تواند برای محاسبات و شبیه‌سازی سیستم‌ها بکار رود. این مدل قابلیت ارائه شبیه‌سازی ساده از یک فرایند پیچیده مانند فرایندهای هیدرولوژیکی را دارد (لیفنگ، ۲۰۰۸، ۲۱). مدل CA چشم‌انداز جدیدی را در مدل‌سازی رواناب در دشت‌های بزرگ بر اساس اطلاعات ماهواره‌ای ایجاد کرده است (رینالدی و همکاران، ۲۰۰۷، ۳۱۵). در این مطالعه نیز سعی شده است عملکرد اتومای سلولی در مدل‌سازی بارش-رواناب بررسی گردد. برای رسیدن به این هدف رواناب حوضه ليقوان با استفاده از CA تخمین زده شده است. در این مدل منطقه‌ی مطالعاتی به کمک مجموعه‌ای از سلول‌ها شبکه‌بندی می‌شود. کلیه مشخصات لازم برای مدل‌سازی در درون سلول یکسان و یکنواخت در نظر گرفته می‌شود و از طریق تکرار یکسری از قوانین ساده‌روی هرکدام از سلول‌ها و نیز اعمال قوانین انتقال رفتار کل سیستم مشخص می‌شود. مدل اتومای سلولی توسط محققین مختلف برای مدل‌سازی در علوم مختلف بکار گرفته شده است و اولین بار در هیدرولوژی توسط مورای و پوآلا در سال ۱۹۹۴ برای مدل‌سازی حریم رودخانه بکار برده شد. پس از آن محققان زیادی از اتومای سلولی در هیدرولوژی و شبیه‌سازی رواناب استفاده نمودند. از جمله: وو و همکاران (۲۰۰۶) رواناب حوضه Levan در چین را به‌خوبی با اتومای سلولی شبیه‌سازی کردند. پارسونز و فونستاد (۲۰۰۷) یک مدل اتومای سلولی برای شبیه‌سازی رواناب سطحی را ارائه دادند. هیدروگراف‌های موج سیلاب به‌دست‌آمده از مدل CA به هیدروگراف‌های مشاهداتی حوضه ولنلا گولچ در آریزونا، آمریکا بسیار نزدیک بود که نشان‌دهنده دقت بالای مدل ارائه‌شده می‌باشد. ون و همکاران (۲۰۰۷) مدل اتومای سلولی را برای پیش‌بینی سیلاب رودخانه‌ای در لائوس به‌کار برده و نشان دادند که این مدل، روشی مناسب برای مدل‌سازی سیستم‌های پیچیده هیدرولیکی می‌باشد. رینالدی و همکاران (۲۰۰۷) رواناب حوضه سانتاکاتالینا در آرژانتین را با اتومای سلولی شبیه‌سازی نمودند. این محققان جریان سطحی طبیعی را با در نظر گرفتن ذخیره سطحی، نفوذ، تبخیر و تعرق به‌خوبی شبیه‌سازی نمودند. رینالدی و همکاران (۲۰۱۲) هیدروگراف‌های سیل ناشی از بارش را که در ماه می، آگوست و اکتبر سال ۲۰۱۲ در ناحیه پامپین در آرژانتین رخ داده بود، با اتومای سلولی شبیه‌سازی نمودند و نتایج آن‌ها نشان داد که اتومای سلولی به‌خوبی قادر به ترسیم هیدروگراف سیل مربوط به رگبارهای ساده و مرکب می‌باشد. کرباس و پودهورانی (۲۰۱۳) جریان رودخانه استراویکا در کشور چک را با CA شبیه‌سازی کردند و با مقایسه نتایج شبیه‌سازی با مقادیر مشاهداتی نشان دادند که CA قابلیت بالایی در شبیه‌سازی جریان دارد. شائو و همکاران (۲۰۱۴)، رواناب دو حوضه پین گلن و اسنوشو را در آمریکا بر پایه CA شبیه‌سازی نمودند. برای محاسبه رواناب ناشی از دو رخداد بارش، نفوذ و برگاب را نیز در نظر گرفتند. مطابقت هیدروگراف‌های به‌دست‌آمده از CA با نتایج اندازه‌گیری دلیل بر توانایی مدل CA بود. ویجسکارا و همکاران (۲۰۱۰) تغییرات کاربری اراضی حوضه رودخانه البو در آلبرتای کانادا را در طی دوره زمانی ۲۰ ساله با استفاده از مدل اتومای

<sup>1</sup> Cellular Automata

سلولی استخراج و تأثیر آن را بر فرایندهای هیدرولوژیکی بخصوص جریان رودخانه بر اساس مدل‌های توزیعی هیدرولوژیکی MIKE-SHE و MIKE-11 موردتحقیق و بررسی قراردادند. مطالعه انجام‌شده نشان می‌دهد که مدل اتومای سلولی در مدل‌سازی تغییرات کاربری نسبت به سایر روش‌های مرسوم دقت بالاتری دارد. هنکوک و کولتارد (۲۰۱۲) به مدل‌سازی فرسایش و حرکت مجرا در پاسخ به تغییرات بارش در حوضه‌ی استانی در جنوب شرق استرالیا پرداختند. در این تحقیق از یک مدل اتومای سلولی بنام CAESAR<sup>۱</sup> (مدل CA شبیه‌سازی تکامل دامنه و رودخانه) که توانایی بالایی در نمایش میزان فرسایش و تغییرات مجرا می‌باشد استفاده کردند. خالقی (۲۰۱۴) نیز تأثیر تغییرات کاربری اراضی حوضه ليقوان را در طی ۱۰ سال بر میزان فرسایش و رسوب‌گذاری را با استفاده از مدل CAESAR بررسی نمود.

همچنین این مدل به‌طور گسترده‌ای برای مدل‌سازی مواردی که پیچیدگی بیشتری نسبت به رواناب‌ها دارد نظیر تند آب‌ها و گلفشان‌ها بکار رفته و نتایج با دقت بالا داشته است. از جمله: آرای و باسوکي (۲۰۱۰) گلفشان سیدوراجو در اندونزی را به‌منظور تعیین نواحی زیرآب رفته در اثر این پدیده پیچیده با استفاده از اتومای سلولی شبیه‌سازی نمودند. مقایسه نتایج شبیه‌سازی با تصاویر SPOT/HRV و ASTER/VNIR و ASTER حاصل از دو گلفشان و با داده‌های واقعی اندازه‌گیری شده حاکی از توانایی بالای CA در شبیه‌سازی این پدیده دارد. دوینت و همکاران (۲۰۱۴) مشخصات و احتمال وقوع تندآب را در ۱۴۸ حوضه در فرانسه را با ۱۶ حالت مختلف بارش با بهره‌گیری از اتومای سلولی مورد ارزیابی قراردادند. در این تحقیق علاوه بر تخمین دبی پیک جریان، دبی ویژه و زمان تأخیر تندآب، بارش‌هایی که منجر به وقوع تندآب می‌گردد و نیاز به پیغام هشدار سیلاب دارد را نیز شناسایی نمودند. موقعیت و مقدار ماکزیمم دبی‌های به‌دست‌آمده از CA در حوضه‌ها هماهنگی کاملی با وقایع مشاهداتی دارد.

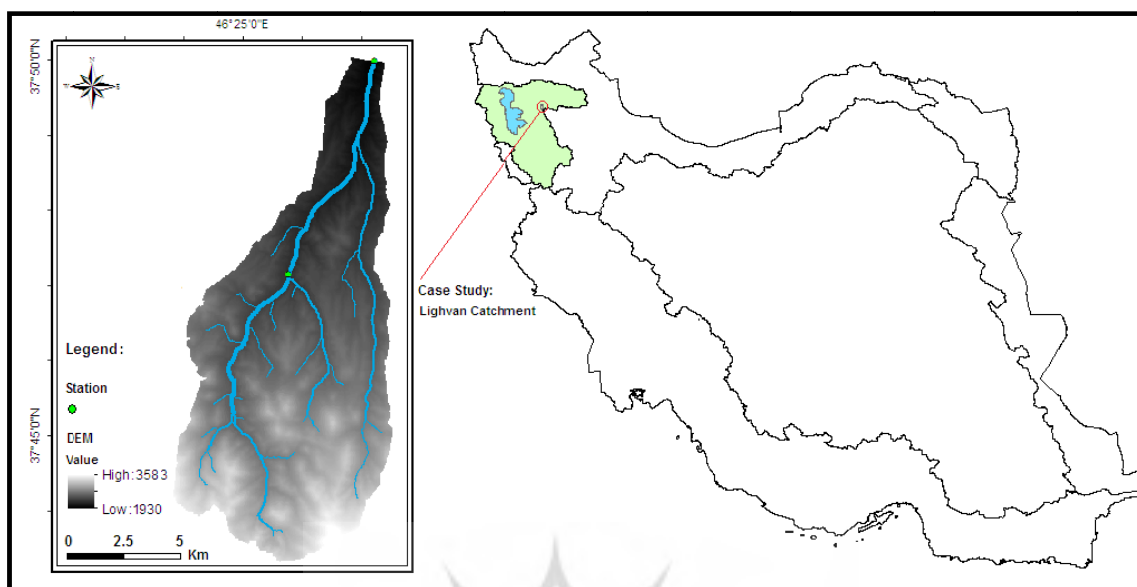
## ۲- منطقه مورد مطالعاتی

حوضه معرف ليقوان چای یکی از زیر حوضه‌های دریاچه ارومیه بوده و با وسعتی معادل ۷۶ کیلومتر مربع در دامنه شمالی سهند طول شرقی ۲۰° ۴۶' تا ۲۷° ۴۶' و عرض شمالی ۴۲° ۳۷' تا ۴۹° ۳۷' واقع شده است. رودخانه ليقوان چای به‌عنوان زهکش حوضه مذکور می‌باشد و ارتفاع و شیب متوسط آن به ترتیب ۲۶۷۵ متر و ۱۱ درصد می‌باشد. در داخل محدوده حوضه ليقوان چای دو ایستگاه هیدرومتری به نام‌های ليقوان و هروی وجود دارند. شکل ۱ موقعیت و جدول ۱ خلاصه مشخصات آماری پارامترهای هیدرولوژیکی بارش و رواناب را در دوره آماری ۱۳۶۱ الی ۱۳۸۸ نشان می‌دهد (ملکانی، ۱۳۹۳).

جدول ۱- مشخصات آماری پارامتر هیدرولوژیکی رواناب حوضه‌های آبریز مورد مطالعه

مشخصه‌های آماری	بارش ماهانه (میلی‌متر)		دبی ماهانه (مترمکعب بر ثانیه)	
	لیقوان‌چای	هروی	لیقوان‌چای	هروی
تعداد داده‌ها	۳۲۴	۳۲۴	۳۲۴	۳۲۴
میانگین	۲۷/۵۰	۲۰/۴۵	۰/۶۳	۰/۸
حداقل مقدار	۰	۰	۰	۰/۱۳
حداکثر مقدار	۱۵۰/۲	۱۲۴	۵/۶۹	۵/۲۸
انحراف معیار	۲۱/۲۶	۲۲/۷۱	۰/۷۸	۰/۸۵
ضریب چولگی	۱/۵۷	۱/۷۹	۲/۹۴	۲/۵۰

<sup>۱</sup> Cellular Automaton Evolutionary Slope And River



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی حوضه ليقوان چای

### ۳- مواد و روش‌ها:

#### ۳-۱- اتومای سلولی

اتومای سلولی (CA) را می‌توان در پدیده‌های فیزیکی که رفتار پدیده با معادلات دیفرانسیلی حاکم بر آن تشریح می‌شود بکار برد. مفهوم اتومای سلولی اولین بار توسط جان ون نیومن و استان اولام در سال ۱۹۵۰ ارائه گردید. اتومای سلولی سیستم‌های ساده گسسته‌ای هستند که با قوانین ساده و محلی می‌توانند محاسبات و رفتارهای پیچیده‌ای از خود بروز دهند. محلی بودن به این معنا است که در تعیین مقدار جدید هر سلول، سلول‌هایی که در همسایگی خود هستند تأثیرگذار هستند و سلول‌های دورتر تأثیری ندارند. هر سلول برای خود مجموعه‌ای از حالات را دارد که وضعیت یا حالت خود را در گام‌های زمانی گسسته ثابت، مطابق با قانون محلی تغییر می‌دهد. قوانین حالت در طول کار ثابت هستند و تغییر نمی‌کند. استفاده از فرمول‌های ساده و شناخته‌شده به‌عنوان قوانین انتقال از مزایای این مدل می‌باشد.

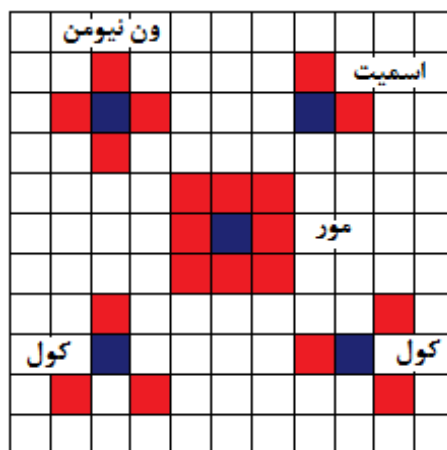
استفاده از مدل CA نیازمند تعیین شبکه اتومای سلولی، نوع همسایگی آن و قانون انتقال محلی می‌باشد. در اتومای سلولی فضا به‌صورت یک شبکه تعریف می‌گردد که به هر خانه آن یک سلول گفته می‌شود. شبکه سلول‌ها می‌تواند ابعاد متفاوتی داشته باشند و یک، دو و یا سه‌بعدی باشد همچنین اشکال مختلفی از شبکه وجود دارد که به طبیعت پدیده فیزیکی وابسته است. شبکه مربعی رایج‌تر از دو نوع دیگر مثلثی و شش‌گوشه می‌باشد.

در CA می‌توان از ساختارهای مختلفی برای همسایگی استفاده نمود. نوع همسایگی بکار رفته اهمیت بالایی در بروز نمودن حالت یک سلول دارد زیرا تعیین‌کننده تعداد همسایگان شرکت‌کننده در قانون انتقال محلی بوده و بر روی شبکه انتقال مابین سلول‌ها تأثیرگذار است. معمول‌ترین آن‌ها همسایگی ون نیومن، مور، اسمیت و کول می‌باشد (شکل ۲).

قوانین انتقال به‌عنوان موتور اصلی تغییرات در CA شناخته‌شده و به‌صورت اختصاصی برای هر مسئله و با توجه به فیزیک مسئله محاسبه می‌شود. این قوانین طرز عمل سیستم واقعی را منعکس می‌کنند، همچنین سیستم‌ها را به عناصر ساده‌ای تجزیه می‌کنند که پویایی سیستم در اثر همین عناصر است (بتی و همکاران، ۱۹۹۷، ۱۶۰؛ تارنر، ۲۰۰۰، ۱۷).

با توجه به طبیعت پیکسلی داده‌های سنجش‌از‌دور و دیگر منابع و همچنین برنامه‌نویسی آسان‌تر، بیشتر مدل‌های CA در یک شبکه دوبعدی تشکیل می‌گردند (بتی، ۱۹۹۹، ۲۰۶؛ بتی، ۲۰۰۵). در این تحقیق نیز از یک اتومای سلولی دوبعدی

مربعی شکل، با شعاع همسایگی یک و شکل همسایگی مور یا هشت‌تایی استفاده شده است. با در نظر گرفتن احتمال پخش و انتقال آب در تمامی جهات (هر هشت سلول کناری) شکل همسایگی مور انتخاب گردیده است.



شکل ۲- انواع همسایگی در مدل اتومای سلولی

مدل رقمی ارتفاع<sup>۱</sup> منطقه (DEM) و لایه‌های رستری حاصل از تمامی پارامترهای مؤثر به صورت یک شبکه‌بندی دوبعدی با ابعاد مشخص ۲۰\*۲۰ متر تشکیل‌دهنده فضای سلولی مدل اتومای سلولی پیشنهادی می‌باشد. تراز آب در سلول‌ها به‌عنوان حالت سلول در نظر گرفته می‌شود. تراز آب سلول‌ها (H) از طریق رابطه (۱) محاسبه می‌گردد. در این رابطه Z ارتفاع سلول مرکزی که با توجه به DEM حوضه مشخص می‌گردد،  $H_p$  ارتفاع آب ناشی از بارش باران در سلول و  $H_n$  ارتفاع آب دریافتی از سلول‌های همسایه می‌باشد.

$$H = Z + H_p + H_n \quad (1)$$

ارتفاع آب حاصل از نزول باران با استفاده از روابط هیدرولوژیکی مختلف نظیر رابطه استدلالی (موسوی و همکاران، ۲۰۱۳)، رابطه SCS (وو و همکاران، ۲۰۰۶)، رابطه مانینگ (ون و همکاران، ۲۰۰۷؛ کریاس و پودهورانی، ۲۰۱۳) و غیره تخمین زده می‌شود. رابطه SCS به‌عنوان ساده‌ترین و پرکاربردترین روش محاسبه سیلاب شناخته شده است و در این مقاله نیز از روش SCS استفاده شده است.

در این تحقیق قوانین انتقال در قالب قواعد فازی بیان می‌گردد. مدل‌سازی با تعریف قوانین ساده انجام می‌گیرد. قوانین انتقال یا تعیین جهت جریان بر اساس فرضیه انتقال آب از یک سلول با بار پتانسیل بزرگ‌تر به سلول مجاور دارای بار پتانسیل کوچک‌تر انجام می‌گیرد. در صورتی که چندین سلول همسایه دارای بار پتانسیل کمتر نسبت به سلول مرکزی باشد آب به سلولی که اختلاف بار بیشتری با سلول مرکزی دارد جریان می‌یابد. برای سلول‌های همسایه قطری اختلاف ارتفاع پس از تقسیم بر جذر ۲ با سلول‌های دیگر مقایسه می‌شود (جنسون و دمینگو، ۱۹۸۸، ۱۵۹۴). این روش تعریف شبکه زهکشی، روش SFD8<sup>۲</sup> نامیده می‌شود.

الگوریتم D8 متداول‌ترین روش برای تعیین جهت جریان استفاده کرده‌اند (یانگ، ۲۰۱۰، ۴۴۳؛ کنی و ماتوس، ۲۰۰۵، ۷۷۰؛ ژائو و همکاران، ۲۰۰۹، ۲). در حال حاضر نرم‌افزارهای مختلفی نظیر IDRISI، ESRI's spatial Analyst، GRASS و ArcView از این روش برای استخراج آبراهه استفاده نموده‌اند. در GIS اکستنشن‌های الحاقی پر کاربرد Archydro و AdB Toolbox از الگوریتم D8 استفاده می‌نمایند. همچنین در بسیاری از مدل‌ها نظیر WMS،

<sup>۱</sup> Digital Elevation Model

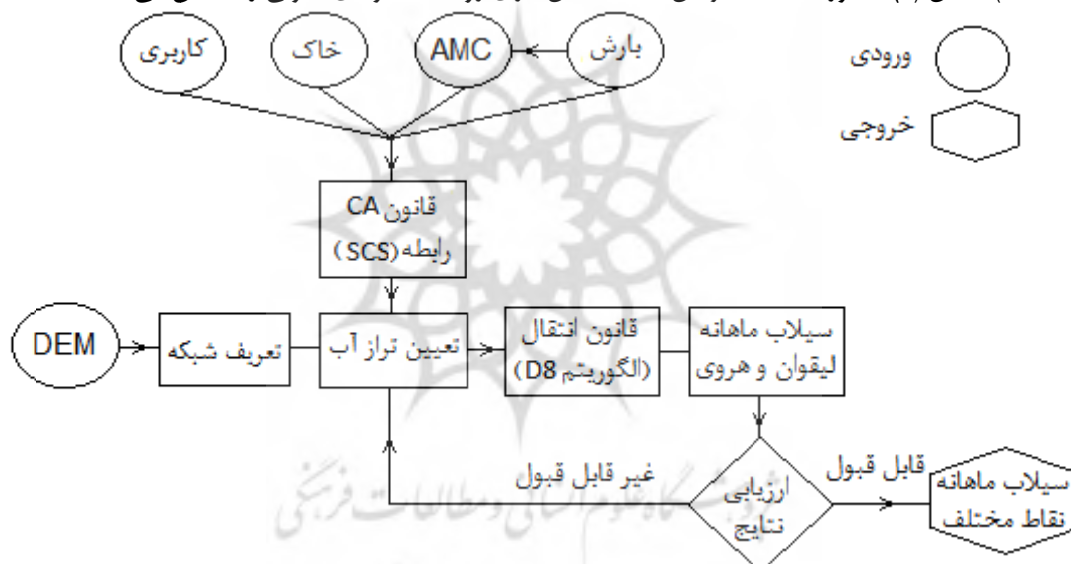
<sup>۲</sup> Single Flow Direction chosen from 8 possibilities

AGNPS و OFAT بکار رفته است (کنی و ماتتوس، ۲۰۰۵، ۷۷۰). عیب روش SFD8 ایجاد خطوط موازی جریان است که در مناطق هموار بیشتر بروز نموده اما برای مناطق کوهستانی نتایج خوبی می‌دهد. قانون فازی برای تعریف شبکه جریان به صورت زیر تعریف شده است:

اگر همه سلول‌های همسایه دارای تراز بالاتر از سلول مرکزی باشند، سلول مرکزی چاه<sup>۱</sup> می‌باشد و آب در آن جمع خواهد شد. در غیر این صورت آب به سلولی که تندترین شیب نزولی با سلولی مرکزی داشته باشد جاری می‌گردد. شیب سطح آب با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌گردد. در این رابطه D فاصله بین مراکز سلول‌ها می‌باشد.

$$S = (\Delta H/D) * 100 \quad (2)$$

قانون فازی تا مرحله رسیدن تنظیم تراز آب در تمامی سلول‌ها تکرار خواهد شد. همان‌طور که در بالا اشاره شده برای محاسبه ارتفاع آب هر سلول از روش SCS استفاده شده است. اکثر مدل‌های شناخته شده در آبخیزداری و هیدرولوژی مانند SWAT، WMS، EPIC، AGNPS، MIKE 11، HEC، MIKE و FLOOD و غیره برای محاسبه رواناب از روش SCS استفاده می‌کنند (کاپ و نومن، ۲۰۰۸، ۳۸؛ ملکانی و همکاران، ۲۰۱۴، ۱۸۱). شکل (۳) به طور شماتیک مراحل مختلف مدل‌سازی رواناب با اتومای سلولی را نمایش می‌دهد.



شکل ۳- فلوچارت مدل‌سازی بارش-رواناب با اتومای سلولی

زبان‌های برنامه‌نویسی متعددی جهت ساخت برنامه‌های کاربردی مورد نیاز طراحی شده‌اند از جمله: بیسیک، پاسکال، C، فرترن، PHP، پایتون و غیره. این زبان‌ها همه‌روزه ساده‌تر و قدرتمندتر می‌شوند. تعداد زیادی از برنامه‌نویسان پایتون را به دلیل سادگی، سهولت خواندن، انعطاف‌پذیری و امکانات فراوان به‌عنوان زبان برنامه‌نویسی برگزیده‌اند. پایتون یک زبان سطح بالا بوده و امروزه کاربرهای بسیار قوی از آن استفاده می‌نمایند. پایتون، زبان برنامه‌های کاربردی GIS می‌باشد و برنامه نوشته شده با پایتون می‌تواند هماهنگی کاملی با محیط GIS و ابزارهای آن داشته باشد درحالی که زبان‌های رایج دیگر نظیر جاوا این قابلیت را ندارند. بنابراین در این تحقیق از زبان برنامه‌نویسی پایتون برای مدل CA استفاده شده است. مزیت عمده زبان پایتون شیء‌گرا بودن آن است یعنی می‌توان از برنامه‌های نوشته شده توسط سایر برنامه‌نویسان استفاده نمود (عباسی، ۱۳۹۳). این مزیت کاربرد و کمک فراوانی به کاربر می‌نماید به گونه‌ای که می‌توان از ابزارهای

<sup>1</sup> Sink

- GIS به‌سادگی در برنامه استفاده نمود و نیازی به نوشتن مجدد برنامه نمی‌باشد. با استفاده از این زبان می‌توان قوانین ساده ریاضی تحت عنوان قوانین انتقال مدل CA را نوشته و اجرا نمود.
- مدل اتومای سلولی باهدف مدل‌سازی بارش-رواناب شامل مراحل زیر می‌باشد:
- ۱- برنامه محاسبه ارتفاع رواناب ناشی از بارش در سلول‌ها
  - ۲- برنامه تعیین تراز آب سلول‌ها، درواقع با اجرای آن وضعیت و حالت هر سلول تعیین می‌شود. هر سلول حاوی اطلاعات ارتفاع از DEM و ارتفاع رواناب از مرحله اول می‌باشد که مجموعاً مشخص‌کننده تراز آب خواهد بود.
  - ۳- برنامه تعیین جهت جریان و گسترش سیلاب. برای تعیین جهت جریان از الگوریتم D8 استفاده گردید. در این روش جهت‌ها بین ۱ تا ۱۲۸ کدگذاری شده‌اند و ارزش عددی هر سلول مسیر حرکت آب از درون پیکسل به خارج آن را بیان می‌نماید. برای نمونه ۱، ۲، ۴، ۸ به ترتیب نشان‌دهنده جهت‌های شرقی، جنوب شرقی، جنوب، جنوب غربی می‌باشند. ورود نقشه بارش جدید و تکرار مراحل اول تا سوم به‌منظور تولید نقشه رواناب در تمامی ماه‌های دوره آماری
  - ۴- ایجاد سری زمانی ماهانه سیلاب در نقاط دلخواه.

### ۳-۲- آماده‌سازی اطلاعات ورودی

روش SCS یک روش شناخته‌شده در هیدرولوژی است بنابراین از توضیح در رابطه با این روش خودداری شده و تنها به‌طور مختصر به چگونگی آماده‌سازی اطلاعات ورودی اشاره می‌گردد. اطلاعات لازم شامل شبکه بارش، خاک و کاربری و DEM می‌باشد.

#### ۳-۲-۱. شبکه بارش

در این مطالعه پس از مقایسه مقدار RMSE به‌دست‌آمده از روش‌های مختلف درونیابی نهایتاً روش عکس فاصله وزنی بهینه<sup>۱</sup> (OIDW) جهت ایجاد شبکه بارش انتخاب گردید. IDW در صورتی که پارامترهای آن طوری انتخاب گردد که بالاترین دقت درونیابی را داشته باشد OIDW گفته می‌شود. سه عامل در افزایش دقت درونیابی مؤثر است که عبارت‌اند:

#### الف) انتخاب P

ب) تعداد نقاط لازم برای درونیابی (یا شعاع جستجو)

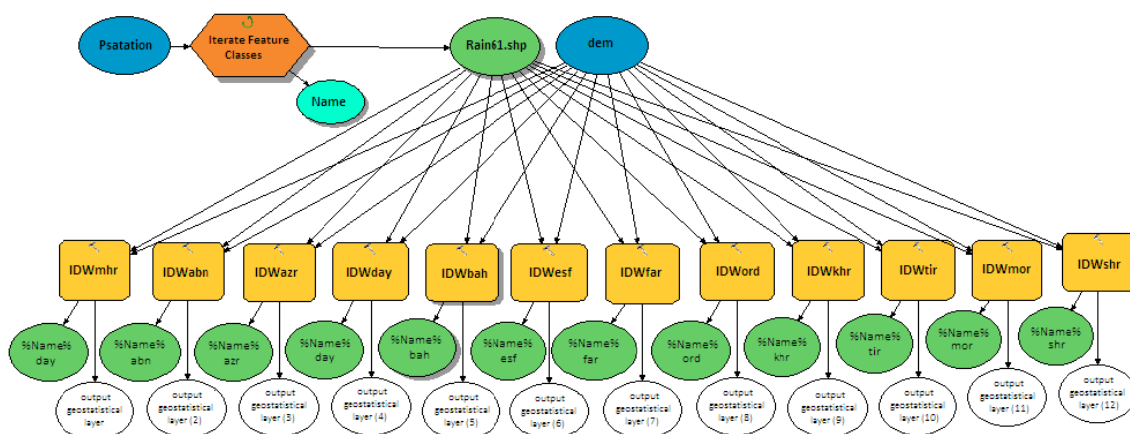
#### ج) شکل پنجره جستجو

درونیابی به روش IDW شدیداً به مقدار P و انتخاب شعاع جستجو وابسته است و بایستی این پارامترها به‌دقت تعیین گردند و تخمین مناسب آن‌ها موجب افزایش دقت و تطابق داده‌های محاسباتی و مشاهداتی خواهد شد (نوری و همکاران، ۲۰۱۴، ۷۷) و در این حالت می‌تواند نتایجی بهتر از کریجینگ داشته باشد (لو و ونگ، ۲۰۰۸، ۱۰۴۴؛ چن و لیو، ۲۰۱۲، ۲۰۹).

در این مطالعه، IDW با توان وزندهی برابر با ۲، تعداد ۱۹ ایستگاه درونیابی و شکل پنجره جستجو بیضوی بر اساس جهت وزش باد منطقه دارای بالاترین دقت بود.

مطابق جدول ۱، برای تهیه نقشه‌های رستری بارش نیاز به ۳۲۴ مرتبه تکرار مرحله درونیابی می‌باشد. بنابراین برای تهیه شبکه بارش از مدل بیلدر استفاده گردید. شکل ۴ ساختار مدل IDW برای محاسبه بارش رستری ماهانه را نشان می‌دهد.

<sup>1</sup> Optimal Inverse Distance Weighted Average



شکل ۴- ساختار مدل IDW برای محاسبه بارش رستری ماهانه

### ۳-۲-۲. خاک

با استفاده از نقشه بافت خاک اخذشده از اداره منابع طبیعی استان آذربایجان شرقی و با بهره‌گیری از جدول سازمان حفاظت خاک آمریکا نقشه گروه‌های هیدرولوژیکی خاک (SHG<sup>۱</sup>) حوضه ليقوان چای تعیین گردید (موکوس، ۱۹۷۲، ۲). شکل ۵ نقشه SHG ليقوان چای را نشان می‌دهد.

### ۳-۲-۳. کاربری اراضی

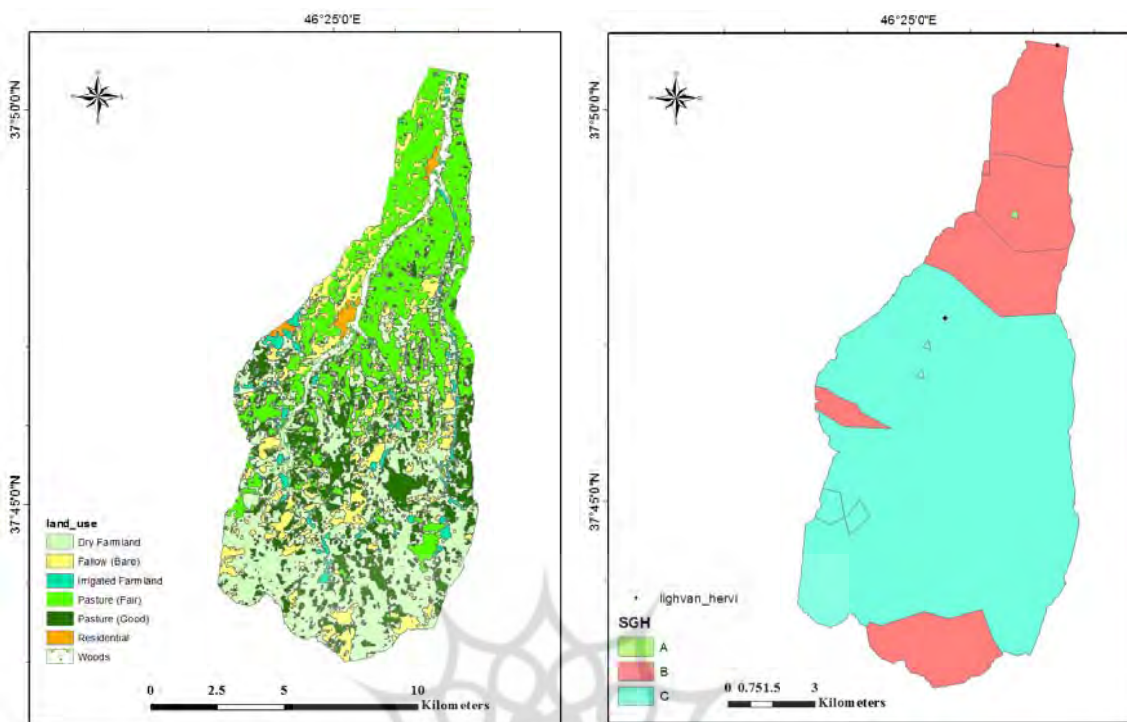
با بهره‌گیری از تصاویر ماهواره‌ای (تصویر ETM+ مربوط به ۱۱ سپتامبر ۲۰۱۳ ماهواره لندست) و پس از اعمال فرآیند پردازش تصاویر و ارزیابی دقت طبقه‌بندی در محیط نرم‌افزار ENVI نقشه کاربری اراضی حوضه ليقوان استخراج گردید (شکل ۶).

### ۳-۲-۴. نقشه شماره منحنی رواناب

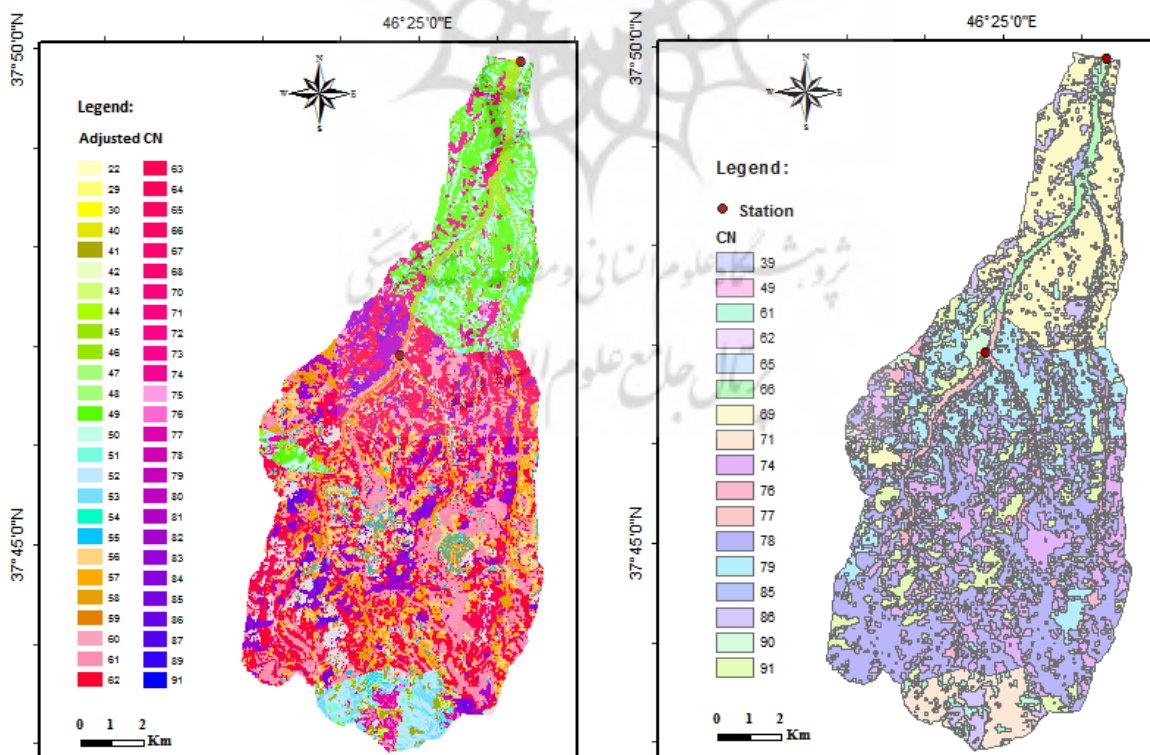
ابتدا نقشه CN برای شرایط نرمال (خاک دارای رطوبت متوسط بوده و شیب بیشتر از ۵ درصد نباشد) از تلفیق نقشه‌های HSG و کاربری و به کمک جداول SCS تهیه گردید (هجلمفلت و موکوس، ۲۰۰۴، ۳). مطابق با روش شرودر و همکاران (۱۹۹۰، ۱۰)، پس از بررسی فراوانی وقوع AMCها، وضعیت ماه‌های سال بر اساس نوع AMC، خشک شناخته گردید و با توجه به شیبدار بودن اراضی ليقوان چای و به دلیل عدم برقراری شرایط نرمال، تصحیحات روی CN با بهره‌گیری از روابط رایج انجام گرفت (پونکه و هاوکین، ۱۹۹۶، ۱۵؛ هوانگ و همکاران، ۲۰۰۶، ۲۰؛ هاوکین و همکاران، ۲۰۰۹). شکل (۷) نقشه شماره منحنی رواناب حوضه ليقوان قبل و بعد از تعدیل نشان می‌دهد. با داشتن آمار رگبار و سیل شماره منحنی مربوط به ۱۰ رخداد با استفاده از روش SCS برآورد و با مقادیر متوسط CN محاسباتی مقایسه گردید که بیانگر دقت بالای نقشه شماره منحنی استخراج‌شده است.

<sup>۱</sup> Hydrologic Soil Groups





شکل ۵- نقشه گروه هیدرولوژیک خاک لیقوان چای / شکل ۶- نقشه کاربری اراضی حوضه لیقوان چای



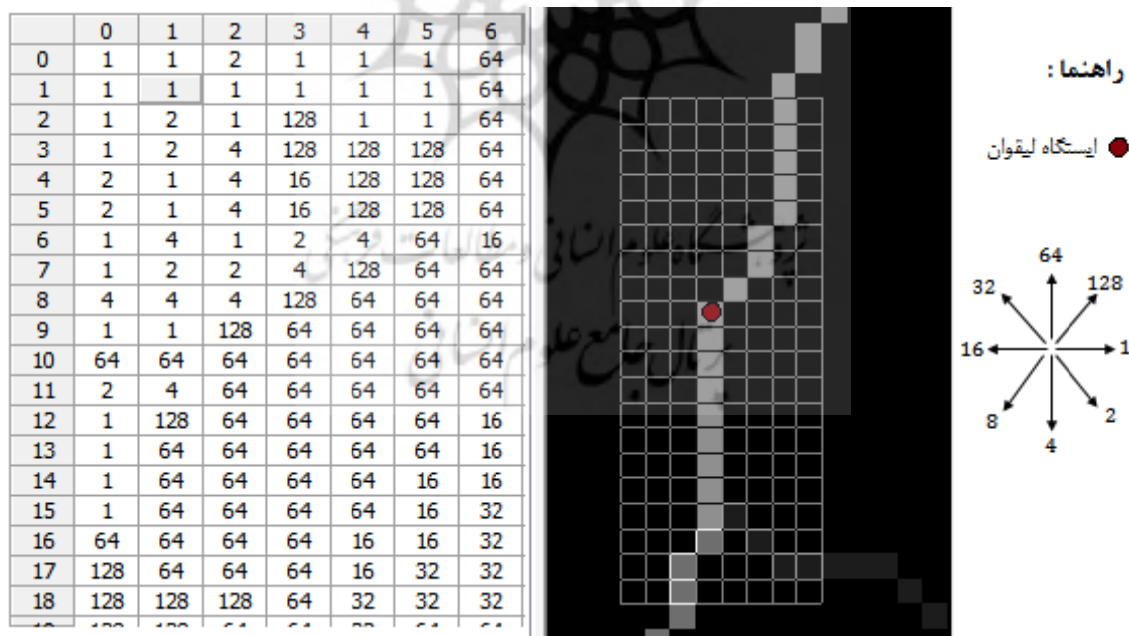
شکل ۷- منحنی رواناب حوضه لیقوان قبل و بعد از تعدیل

## ۱- نتایج

همانطوریکه قبلاً اشاره شد با توجه به سادگی، قدرت، شیء‌گرا بودن پایتون و هماهنگی کامل با محیط GIS، از این زبان برای برنامه‌نویسی جهت مدل‌سازی رواناب استفاده شده است. با اجرای مدل اتومای سلولی دبی ماهانه در هر نقطه‌ای که کاربر لازم داشته باشد به صورت سری زمانی قابل استخراج خواهد بود. برای نمونه ۶ نقطه در داخل حوضه انتخاب شد که دونقطه از این نقاط، در محل ایستگاه‌های ليقوان و هروی به عنوان نقاط کنترل در نظر گرفته شد. مختصات و مساحت حوضه در بالادست این نقاط در جدول (۲) آورده شده است. پس از اجرای مدل اتومای سلولی، به تعداد ۳۲۴ (۲۷\*۱۲) نقشه جهت جریان و نقشه رستری رواناب تولید می‌گردد. در نقشه جهت جریان هر سلول بیانگر مسیر جریان می‌باشد که بروش D8 تعیین گردید. شکل (۸) نقشه مسیر جریان در اردیبهشت ۸۹ را در اطراف ایستگاه ليقوان نمایش می‌دهد.

جدول ۲- موقعیت نقاط منتخب جهت استخراج خروجی

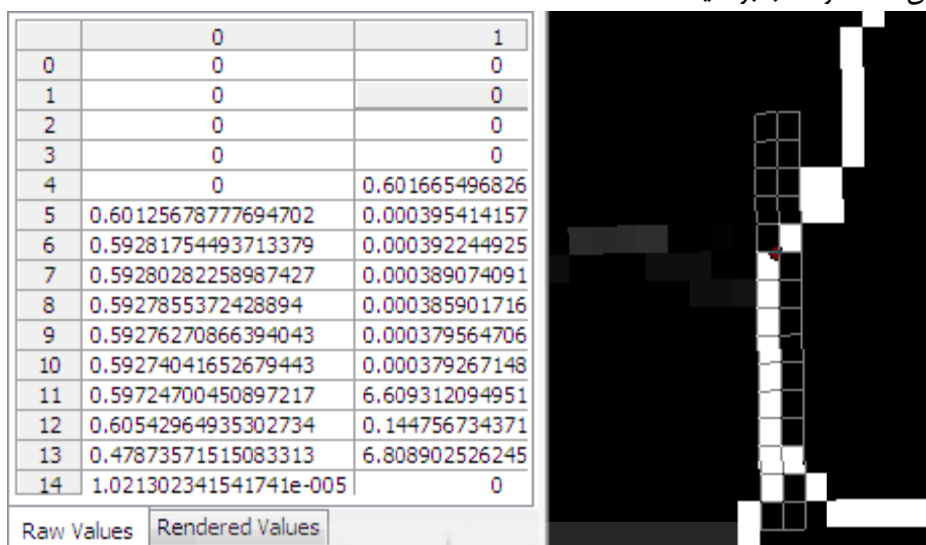
۱	۲	۳ (ليقوان)	۴	۵	۶ (هروی)	
37.7611	37.8060	37.8315	37.8637	37.8870	37.9166	Y_UTM
46.4187	46.4112	46.4339	46.4543	46.4701	46.4793	X_UTM
۲۶۰۰	۲۳۳۰	۲۲۰۰	۲۰۹۰	۲۰۱۰	۱۹۳۰	ارتفاع (m)
۲۱	۴۳	۷۶	۸۹	۱۲۷	۱۳۶	مساحت (km <sup>2</sup> )



شکل ۸- نمایش جهت جریان در محل ایستگاه ليقوان

شکل (۹) مقدار سیلاب محاسبه شده در محدوده اطراف ایستگاه ليقوان در شهریورماه ۸۹ (سال آبی ۸۸) نشان می‌دهد. در این نقشه مقدار هر سلول بیانگر رواناب آن نقطه در ماه و سال مربوطه می‌باشد. با دقت در مقادیر شکل (۹) مشاهده می‌شود که در سلول‌هایی که در مسیر آبراهه قرار نگرفته‌اند مقدار رواناب صفر یا بسیار ناچیز دارند درحالی‌که برای سلول‌های واقع در آبراهه، رواناب قابل ملاحظه‌ای دیده می‌شود. مطابق این شکل مقدار سیلاب شهریورماه سال ۸۸ در

ایستگاه لیقوان ۰/۶ مترمکعب بر ثانیه است.



شکل ۹- مقدار سیلاب محاسبه شده در محدوده اطراف ایستگاه لیقوان

با توجه به اینکه مقدار محاسبه شده توسط رابطه SCS رواناب ناشی از بارش بوده و مقدار دبی پایه در نظر گرفته نشده است. بنابراین برای ارزیابی دقت نتایج با داده‌های مشاهداتی لازم است که مقدار دبی پایه ایستگاه‌های لیقوان و هروی تعیین و به مقادیر دبی سیلابی اضافه گردد. در این مطالعه از روش مینیمم محلی<sup>۱</sup> که یک روش ساده و دارای دقت قابل قبول است برای محاسبه دبی پایه استفاده شد. در جدول (۳) مشخصات آماری سیلاب ماهانه حوضه لیقوان در نقاط منتخب گزارش شده است.

جدول ۳- مشخصات آماری سیلاب ماهانه حوضه لیقوان در نقاط منتخب

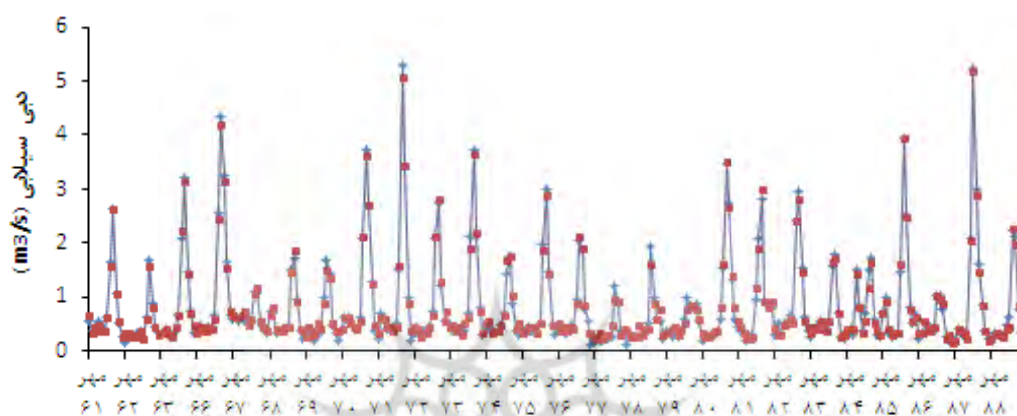
مشخصه‌های آماری	۱	۲	۳-لیقوان	۴	۵	هروی
میانگین	۰/۰۳	۰/۰۶	۰/۱۲	۰/۱۹	۰/۲۶	۰/۲۷
حداقل مقدار	.	.	.	.	.	۰/۰۱
حداکثر مقدار	۰/۲۴	۰/۰۵	۰/۷۴	۰/۷۲	۰/۷۶	۰/۸۹
انحراف معیار	۰/۰۳	۰/۰۷	۰/۱۲	۰/۱۲	۰/۱۶	۰/۱۷
ضریب چولگی	۲/۲۴	۲/۱۴	۱/۹۱	۱/۴	۱/۱۳	۱/۲۵

شکل‌های (۱۰) و (۱۱) سری زمانی دبی مشاهداتی و محاسباتی حوضه لیقوان چای تا ایستگاه هروی و لیقوان را نشان می‌دهد. جهت ارزیابی دقت نتایج مدل از معیارهای کارایی ضریب همبستگی ( $R^2$ )، نش-ساتکلیف (E) و مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده شده است (جدول ۴) (اعلمی و همکاران، ۲۰۱۳، ۵۵).

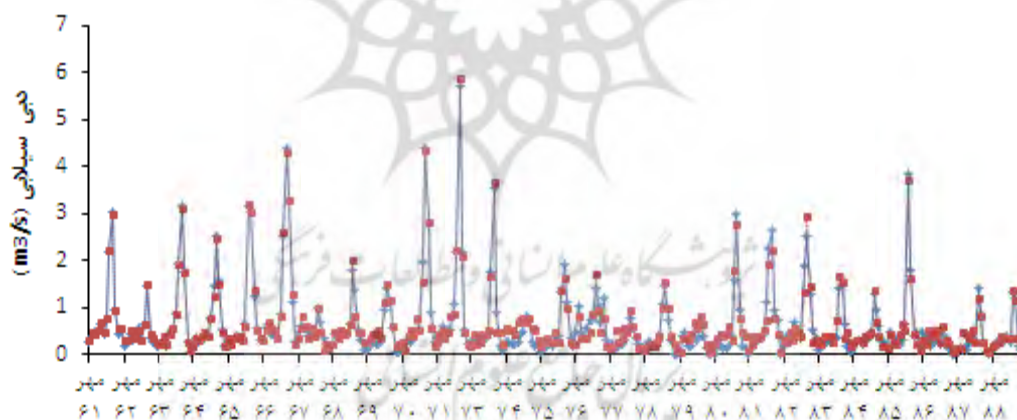
<sup>1</sup> Local Minimun

جدول ۴- مقایسه نتایج رواناب محاسباتی با رواناب مشاهداتی

تا ایستگاه	R <sup>2</sup>	E	RMSE
لیقوان	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۰۷
دبی کل	۰/۹۸	۰/۹۷	۰/۱۰



شکل ۱۰- سری زمانی دبی محاسباتی و مشاهداتی حوضه ليقوان تا ایستگاه ليقوان



شکل ۱۱- سری زمانی دبی محاسباتی و مشاهداتی حوضه ليقوان تا ایستگاه هروی

### نتیجه گیری

هدف اصلی از این مطالعه نشان دادن امکان استفاده از اتومای سلولی برای شبیه‌سازی رواناب بود. این مطالعه نشان داد که یک فرایند پیچیده طبیعی همچون رواناب می‌تواند با روش CA و با استفاده از یک مدل رقمی ارتفاع و لایه‌های رستری که عموماً در دسترس هستند تخمین گردد. لایه‌های خروجی به صورت رستری بوده و حامل اطلاعاتی است که منجر به شناسایی فرایندهای طبیعی مورد مطالعه می‌گردد. تجربه استفاده از اتومای سلولی برای حوضه ليقوان نشان داد که بزرگ‌ترین نقطه قوت آن در تخمین رواناب به صورت سری زمانی ماهانه برای هر نقطه از حوضه است که برای مدیریت حوضه‌های آبریز و طراحی سازه‌های هیدرولیکی حائز اهمیت است.

بین مقادیر مشاهده‌ای و برآوردی بیش از ۹۹ و ۹۷ درصد همبستگی در ایستگاه ليقوان و هروی مشاهده گردید که مبین آن است که رویکرد CA علیرغم سادگی‌اش می‌تواند نتایج واقع‌گرایانه‌ای برای یک رویداد طبیعی پیچیده مانند رواناب فراهم نماید. استفاده از اتومای سلولی برای شبیه‌سازی رواناب بلندمدت حوضه و رواناب ناشی از بارش‌های لحظه‌ای توصیه می‌گردد.

از آنجایی که محدودیت و شرایط خاصی برای استفاده از روش CA وجود ندارد لذا در شبیه‌سازی و تخمین فرایندهای پیچیده طبیعی قابل‌استفاده می‌باشد و می‌توان مشابه با تحقیق انجام‌شده با تغییر در قوانین آن جهت پهنه‌بندی سیلاب، تخمین رسوب و سایر پارامترهای هیدرولوژیکی و ژئومورفولوژیکی بکار برد. لکن بایستی کمال سعی و دقت را در تعیین و تهیه نیازهای اطلاعاتی ورودی صرف نمود.

## منابع

- خالقی، سمیه. ۱۳۹۳. ارزیابی واکنش تغییرات ژئومورفولوژیکی رودخانه‌ای به کاربری اراضی (مطالعه موردی: حوضه آبریز ليقوان چای). پایان‌نامه دکتری. رشته جغرافیای طبیعی. گرایش ژئومورفولوژی. دانشگاه تبریز
- عباسی، محمد. ۱۳۹۳. برنامه‌نویسی شیء‌گرا در ArcGIS با زبان برنامه‌نویسی Python. چاپ اول، انتشارات نوآور.
- ملکانی، لیلا. ۱۳۹۳. بررسی تغییرات دینامیک رواناب با بهره‌گیری از نظریه آشوب و مدل اتومای سلولی. پایان‌نامه دکتری. رشته مهندسی عمران. گرایش آب. دانشگاه تبریز
- Alami, M. T., Ghorbani, M. A., Malekani, L., 2013, *Chaotic Analysis and Prediction of River Flows. Journal of Hydraulic Structures, Vol. 1, No. 1, pp. 54-64.*
- Arai K., Basuki A., 2010, *Simulation of hot mudflow disaster with cell automata and verification with satellite imagery data. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science, Vol. XXXVIII, Part 8, Kyoto Japan.*
- Batty M., 2005. *Cities and complexity understanding cities with cellular automata agentbased models and fractals.* Cambridge, Mass. MIT Press.
- Batty M., Couclelis H. , Eichen M., 1997, *Urban systems as cellular automata. Environment and Planning B. Vol. 24, pp. 159-164.*
- Chen, F. W., Liu, C.W., 2012, *Estimation of the spatial rainfall distribution using inverse distance weighting (IDW) in the middle of Taiwan. Paddy and Water Environment, Vol. 10, No. 3, p. 209-222.*
- Cirbus, J., Podhoranyi, M., 2013. *Cellular Automata for the Flow Simulations on the Earth Surface, Optimization Computation Process, Appl. Math, Vol. 7, No. 6, pp. 2149-2158.*
- Douvinet, J., Van De Wiel, M. J., Delahaye, D., Cossart, E., 2014, *A flash flood hazard assessment in dry valleys (northern France) by cellular automata modelling. Natural Hazards, pp. 1-25.*
- Hawkins, R. H., Ward, T. J., Woodward, D. E., Van Mullem, J. A., 2009, *Curve number hydrology.* ASCE publication.
- Hjelmfelt, A.T. and Mockus, V., 2004, *Estimation of Direct Runoff from Storm Rainfall. Part 630 Hydrology National Engineering Handbook, Chapter 10. United States Department of Agriculture. Natural Resources Conservation Service.*
- Huang, M., Gallichand, J., Wang, Z., Goulet, M., 2006, *A modification to the Soil Conservation Service curve number method for steep slopes in the Loess Plateau of China. Hydrological processes, Vol. 20, No. 3, pp. 579-589.*
- Jenson, S. K., Domingue, J. O., 1988, *Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. Photogrammetric engineering and remote sensing, Vol. 54, No. 11, pp. 1593-1600.*
- Kenny, F., Matthews, B., 2005, *A methodology for aligning raster flow direction data with photogrammetrically mapped hydrology. Computers & Geosciences, 31(6), 768-779.*
- Kopp S., Noman N., 2008, *ArcGIS Spatial Analyst - Hydrologic Modeling. ESRI User Conference Technical Workshop.*
- Lifeng, Y., 2008, *A soil erosion model based on cellular automata. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Sciences, Vol. 37, No. B6b, pp. 21-25.*
- Lu, G.Y., Wong, D.W., 2008, *An adaptive inverse-distance weighting spatial interpolation technique. Computers and Geosciences, Vol. 34, No. 9, pp. 1044-1055.*



- Malekani, L., Khaleghi, S., Mahmoodi, M., 2014, **Application of GIS in Modeling Zilberchai Basin Runoff**. *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. 1, pp. 181-186.
- Mockus, V., 1972, **Hydrologic soil groups**. *National Engineering Handbook*. Part 630. Chapter 7. Hydrology.
- Mousavi, A., Zeaiean Firouzabad, P., shakiba A., Naseri, A., 2003, **Flood Prone Areas Simulating Using Remote Sensing Data and Cellular Automata Model (Case Study : Talar RiverBasin-Iran)**. *Geography*, Vol. 1, pp. 125-144.
- Murray, A B., Paola, C., 1994, **A cellular model of braided rivers**, *Nature*, Vol. 371, No. 1, pp. 54-57.
- Noori, M.J., Hassan, H.H., Mustafa, Y.T., 2014, **Spatial estimation of rainfall distribution and its classification in duhok governorate using GIS**. *Journal of Water Resource and Protection*, Vol. 6, No. 2, pp. 75-82.
- Parsons, J.A., Fonstad, M.A., 2007, **A cellular automata model of surface water flow**. *Hydrological Process*, Vol. 21, No. 16, pp. 2189-2195.
- Patil, J. P., Sarangi, A., Singh, O.P., Singh, A.K., Ahmad, T., 2008, **Development of a GIS Interface for Estimation of Runoff from Watersheds**. *Water Resources Management*, Vol. 22, No. 9, pp. 1221-1239.
- Ponce, V.M., Hawkins, R.H., 1996, **Runoff curve number: Has it reached maturity?** *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 1, No. 1, pp. 11-19.
- Rinaldi, P. R., Dalponte, D. D., Vénere, M. J., Clausse, A., 2007, **Cellular automata algorithm for simulation of surface flows in large plains**. *Simulation Modelling Practice and Theory*, Vol. 15, No. 3, pp. 315-327.
- Rinaldi, P., Dalponte, D., Venere, M., Clausse, A., 2012, **Graph-based cellular automata for simulation of surface flows in large plains**. *Asian J. Applied Science*, Vol. 5, pp. 224-231.
- Schroeder, S.A.E., J. W., Larsen, J. K., 1990, **Antecedent moisture conditions for North Dakota runoff predictions North Dakota**. *Farm Research*, Vol. 48, No. 0097-5338, pp. 8-11.
- Shao, Q., Baumgartl, T., Huang, L., Weatherley, D., 2014, **A Cellular Automata Based Model for Simulating Surface Hydrological Processes in Catchments**. *EGU General Assembly Conference*. Vienna, Austria.
- Shao, Q., Baumgartl, T., Huang, L., Weatherley, D., 2014, **A cellular automata-based run-of model and its application in mined land rehabilitation designs**. In *Life-of-Mine Conference*, Brisbane, Australia, pp. 81-96.
- Torrens, P. M., 2000, **How cellular models of urban systems work**. *CASA Working Paper 28*. University College London, Centre for Advanced Spatial Analysis.
- Van, T.P.D., Carling P.A., Coulthard T.J., 2007, **Cellular automata approach for flood forecasting in a bifurcation river system**. *Geophys*, Vol. 7, No. 401, pp. 255-262.
- Wu, H., Yi, Y., Zhang, X. 2006. **HydroCA: A watershed routing model based on GIS and cellular automata**. *SPIE Proceedings*, 6119, pp. 1-9.
- Zhan, X., Huang M.L., 2004, **ArcCN-Runoff: an ArcGIS tool for generating curve number and runoff maps**. *Environmental Modeling & Software*, Vol. 19, pp. 875-879
- Zhao, G. J., Gao, J. F., Tian, P., Tian, K., 2009. **Comparison of two different methods for determining flow direction in catchment hydrological modeling**. *Water Science and Engineering*, Vol. 2, No. 4 , pp. 1-15