Archive of SID

تحقیقات منابع آب ایران
Iran-Water Resources Research

سال دوم، شماره ۳، زمستان ۱۳۸۵
Volume 2, No. 3, Winter 2007 (IR-WRR)
۳۹-۵۰

مقایسه روش‌های استخراج خطوط همزمان پیمایش برای استفاده در روش روندیابی زمان – مساحت

علیرضا شکوهی[۱] و بهرام ثقفیان[۲]

چکیده

روش زمان – مساحت یکی از مناسب‌ترین و ساده‌ترین تکنیک‌های روندیابی حوضه‌ها می‌باشد و بالقوه می‌تواند به عنوان یک مدل توزیعی مورد استفاده قرار گیرد. کاربرد روش زمان – مساحت با نرم افزارهای GIS به سهولت امکان‌پذیر است. در این مقاله روش‌های موجود برای تعیین موقعیت خطوط همزمان پیمایش (ایزوکرون) در مقایسه با روش تحلیلی موج سینماتیک مطالعه شده‌اند. در بسیاری از روش‌های موجود، زمان پیمایش با فرض تناسب زمان تمرکز با توانی از فاصلهٔ نقاط تا خروجی حوضه، تعیین می‌شود. در این تحقیق با بررسی طیفی از توانها نشان داده شده است که در صورت در نظر گرفتن جهت صحیح حرکت موج و تعیین موقعیت خطوط هم پیمایش از بالادست حوضه به سمت پایین دست، توان مناسب برای آنکه استفاده از روش زمان – مساحت نزدیکترین هیدروگراف را به راه حل تحلیلی موج سینماتیک بدست دهد کدام است. بدین ترتیب به کمک نتایج این تحقیق می‌توان از این پس بجای استفاده از روش‌های تجربی تولید خطوط همزمان پیمایش ، از روشی مبتنی بر هیدرولیک امواج استفاده نمود.

کلمات کلیدی: زمان – مساحت، موج سینماتیک، زمان تعادل، خطوط همزمان پیمایش، طول جریان

۱- استادیار، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران
۲- دانشیار، مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، تهران، ایران

Isochrones Mapping Methods in Time-Area Routing Technique

A. Shokoohi[1] and B. Saghafian[2]

Abstract

The Time–Area method is a suitable technique for watershed routing and can be potentially used as a distributed model. As an advantage, it can also be used as a GIS-based method. The performance of the existing methods for deriving isochrone locations is compared in this study with that of the kinematic wave theorem. In most methods, travel time is proportional to the distance-to-outlet of any point raised to a power. Investigating the numerical value of powers, it is shown that exponent 1.5 of Laurenson's method yields the closest time-area hydrograph to that of the kinematic wave solution. Therefore, this paper showed that certain empirical isochrone delineation methods could be applicable provided that the travel length is measured towards the outlet.

Keywords: Time-Area, Isochrones mapping, Kinematics wave, Time to equilibrium, Travel length.

1- Assistant Professor of International University Of Imam Khomeini, Ghazvin, Iran, shokoohi@ikiu.ac.ir
2- Associate Professor of Soil Conservation and Watershed Management Center, Tehran, Iran, saghafian@acwmri.ac.ir

www.SID.ir

Archive of SID

۱- مقدمه

روش زمان – مساحت به عنوان یک مدل بارش- رواناب یا یک روش روندیابی حوضه‌ای هیدرولوژیکی، هیدروگراف سیلاب را بر اساس هیتوگراف بارش مؤثر محاسبه می‌نماید. در این روش، با صرفنظر کردن از اثرات ذخیره، حوضهٔ آبخیز به کمک خطوط همزمان پیمایش[1] تا خروجی حوضه به تعدادی زیرمساحت تقسیم می‌شود. از هیستوگرام زیرمساحت‌های بدست آمده به عنوان هیستوگرام زمان-مساحت[2] یاد شده و اساس و پایه روش زمان-مساحت برای تبدیل بارش مؤثر به رواناب را تشکیل می‌دهد. به منظور تشکیل هیستوگرام TAH ، زمان تعادل حوضه که در ادبیات هیدرولوژیکی غالباً به نام زمان تمرکز خوانده می‌شود، باید به چند قسمت مساوی تقسیم گردد. فاصله زمانی حاصل از شکست زمان تعادل همان فاصله زمانی خطوط همزمان پیمایش خواهد بود.

مطابق آنچه که در منابع آمده است، خطوط همزمان پیمایش همدیگر را قطع نمی‌کنند، بسته نیستند و از مرزهای حوضه شروع شده و بدان‌ها ختم می‌شوند. در صورت ثابت بودن سایر عوامل، خطوط همزمان پیمایش در نقاط دارای شیب کم (نزدیک به خروجی حوضه)به هم نزدیک و در نقاط پرشیب (بالادست حوضه) با فاصله بیشتری نسبت به هم قرار میگیرند (شکل ۱).

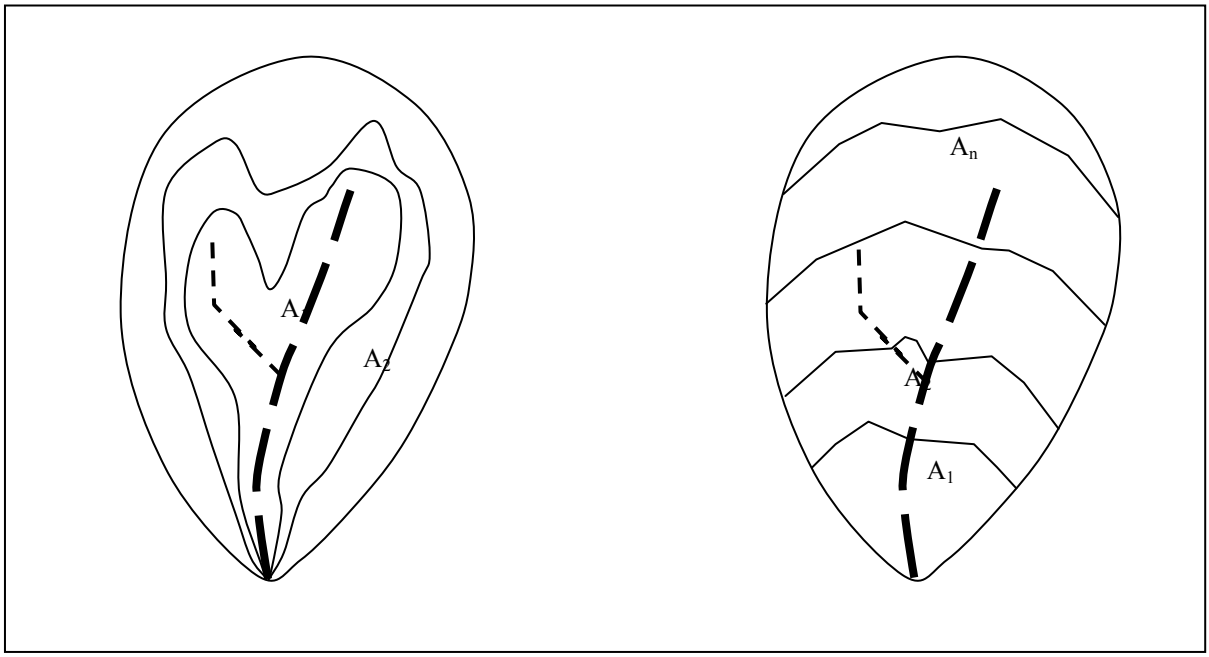
به طور کلی می‌توان گفت که هیستوگرام زمان – مساحت معرف توزیع زمان پیمایش بخش‌های مختلف حوضه می‌باشد. بر این اساس پس از آنکه مساحت بخشی از حوضه که زمان پیمایش آنها کمتر یا مساوی مقداری مشخص، مثلاً t است، تعیین شد با ترسیم مساحت انباشته در مقابل زمان، منحنی تجمعی زمان – مساحت بدست می‌آید. بر این اساس هر نقطه از منحنی مزبور معرف مساحتی از حوضه است که در زمانی مشخص بعد از وقوع رگبار، در خروجی حوضه برای تشکیل رواناب مشارکت می‌نماید (شکل ۲).

منحنی تجمعی مساحت در مقابل زمان شبیه مفهوم هیدروگراف S می‌باشد. با توجه به آنکه در تئوری روش زمان – مساحت اثرات ذخیره و دیفیوژن دیده نمی‌شود، برای بدست آوردن عرض بخش صعودی هیدروگراف رواناب در زمان t، ناشی از یک رگبار مؤثر و با شدت ثابت در زمان، کافی است شدت مؤثر در بخشی از مساحت حوضه که محدود به خروجی و خط همزمان پیمایش زمان t است ضرب شود(Chow et al., 1988).

بطور کلی رابطه زیر بازای بارش مؤثر متغیر در زمان، برای محاسبه هیدروگراف زمان – مساحت بکار گرفته می‌شود:

$$Q_j = \sum_{k=1}^{j} I_k A_{j-k+1} \qquad (۱)$$

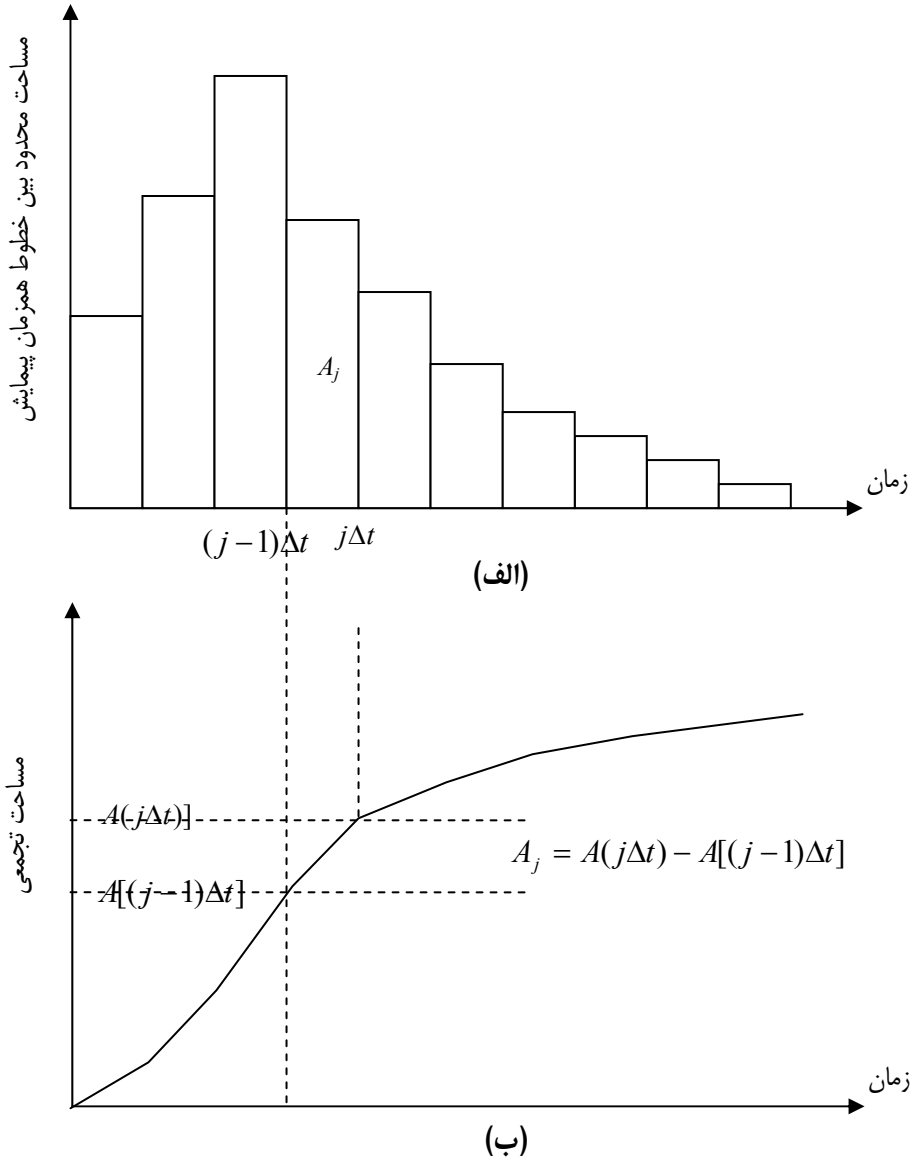
که در آن j معرف گام زمانی ، Q دبی جریان خروجی، I شدت بارش مؤثرو A مساحت محدود به دو خط همزمان پیمایش متوالی است.



شکل ۱- نمایش نحوه تقسیم حوضه آبریز با خطوط همزمان پیمایش (اقتباس از Chow et al., 1988 و Maidment, 1993)

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۲- (الف) هیستوگرام زمان – مساحت و (ب) منحنی تجمعی مساحت (اقتباس از Maidment (1993))

روش زمان – مساحت برای اولین بار توسط کلارک در سال ۱۹۴۵ به عنوان یک روش مناسب و ساده که می‌تواند تغییرات مکانی حوضه و تغییرات زمانی رگبار را شبیه‌سازی نماید معرفی گردید. مهمترین مشکل این روش تولید خطوط همزمان پیمایش می‌باشد که با توجه به امکانات آن زمان عملاً منجر به عدم استفاده گسترده از این روش شد. در سالهای اخیر با توجه به توسعه تکنولوژی کامپیوتری و سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) گرایش زیادی به این روش ملاحظه می‌گردد.

Maidment (1992, 1993) روشی را معرفی می‌کند که از سامانه اطلاعات جغرافیایی[۳] و روش زمان – مساحت برای استخراج یک هیدروگراف واحد با قابلیت توزیع مکانی استفاده می‌نماید.

مدلی را برای شبیه‌سازی هیدروگراف سیلاب، بر اساس ایده هیدروگراف واحد توزیعی در مقابل هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژیکی ارائه نمودند. روش شبیه‌سازی مورد استفاده در این مدل، به تعبیر دو محقق نامبرده ، یک روش مستقیم و تعیینی هیدرولیکی[۴] است که اساس آن روش زمان – مساحت می‌باشد (Ajward and Muzik, 2000) . توسعه یک مدل روندیابی را برای تولید هیدروگراف رواناب مستقیم بر اساس زمان حرکت و بدون استفاده از تئوری هیدروگراف واحد گزارش نموده‌اند (Melelsse et al., 2003). براساس گزارش‌های موجود بین ۴۰ تا ۶۰ درصد از پروژه‌های اجرایی اداره مهندسی ارتش آمریکا[۵] با

www.SID.ir

Archive of SID

استفاده از مدل زمان- مساحت (هیدروگراف واحد کلارک) صورت می‌پذیرد (Kull and Feldman, 1998).

دو ویژگی خاص را می‌توان برای روش زمان – مساحت بیان داشت:

– با استفاده از روش زمان – مساحت می‌توان توزیع زمانی بارش خالص را در محاسبات بارش – رواناب لحاظ نمود(مطابق رابطه شماره ۱).
– اثر دو ویژگی مهم ژئومورفولوژیکی حوضه ، یعنی شکل حوضه و الگوی زهکشی آن، در تعیین شکل هیدروگراف سیل و دبی اوج آن عملاً در این روش خود را آشکار می‌سازند. *البته این امر وابسته به میزان دقت روش تعیین موقعیت خطوط همزمان پیمایش می‌باشد.*

علیرغم همه تلاشی که به علت تواناییهای ذاتی روش زمان – مساحت برای به روز کردن این روش صورت می‌گیرد تحقیقات در خصوص الگوریتم‌های مورد استفاده برای تعیین موقعیت خطوط همزمان پیمایش بسیار محدود می‌باشد. بر این اساس در حال حاضر،عموم الگوریتم‌های مورد استفاده برای استخراج خطوط همزمان پیمایش تقریبی بوده و مبانی هیدرولیکی مشخصی ندارند. این مسئله به نوبهٔ خود می‌تواند به شکل‌گیری خطاهای نامعلوم از نظر منشأ و بزرگی در محاسبات مربوط به تعیین هیدروگراف منتهی گردد.

در این مقاله به این جنبه از محدودیت‌های روش زمان – مساحت توجه ویژه‌ای مبذول شده است. مقاله حاضر به منظور نمایش میزان دقت روش‌های مختلف تولید خطوط همزمان پیمایش، در یک شبیه‌سازی عمومی نشان می‌دهد که تمامی روش‌های یاد شده در واقع زمان پیمایش را متناسب با توانی از طول پیمایش بدست می‌دهند. بر این اساس مقایسه‌ای میان روش‌های تولید خطوط همزمان پیمایش و اثر آنها در شبیه‌سازی شاخه صعودی هیدروگراف، در مقایسه با روش تحلیلی موج سینماتیک صورت گرفته و نشان داده شده است که بهترین روش تولید خطوط همزمان پیمایش کدام روش می‌باشد. بدیهی است علت انتخاب موج سینماتیک به عنوان معیاری برای مقایسه و صحت‌سنجی روشهای تولید ایزوکرون، داشتن جواب صحیح و دقیق حاصل از حل معادلات حاکم بر حرکت این نوع موج برای پدیده مورد مطالعه می‌باشد.

یکی از مفاهیم پایه در استخراج خطوط همزمان پیمایش و اعمال روش زمان – مساحت، مفهوم زمان تعادل[۶] (t_e) می‌باشد. این زمان طبق تعریف عبارت است از مدت زمان لازم برای حصول دبی حداکثر در شرایط برقراری جریان ماندگار در حوضه، ناشی از رگباری مؤثر و با شدت ثابت در زمان((Singh (1996). زمان تعادل در درجه اول تابعی است از مشخصات رگبار و خصوصیات فیزیکی و هندسی حوضه آبخیز. بر این اساس و از دیدگاهی هیدرولوژیکی می‌توان گفت که زمان تعادل عملاً پاسخ حوضه به رگبار وارده و از خصوصیات شاخص تعادل رگبار حوضه می‌باشد. در اینجا لازم است که به تفاوت میان زمان تعادل و تمرکز[۷] (t_c) توجه شود. زمان تمرکز در واقع عبارت است از مدت زمانی که طول می‌کشد تا دورترین نقطه حوضه از خروجی از دیدگاه هیدرولیکی ، بدون در نظر گرفتن مدت زمان تداوم رگبار(t_r) در رواناب خروجی حوضه مشارکت نماید. برای دوره تداوم بارش(t_r) بزرگتر از زمان تعادل($t_r > t_e$) و تحت یک بارش مؤثر ثابت در زمان، $t_c = t_e$ خواهد بود. قابل ذکر است که چون، دورترین نقطه از نظر هیدرولیکی و نه از نظر فیزیوگرافیکی مطرح می‌گردد، برای بارش‌هایی که از نظر مکانی به طور غیریکنواخت بر حوضه می‌بارند دورترین نقطه محل ثابتی نخواهد بود. بر این اساس می‌توان دوری و نزدیکی را بر اساس طولانی ترین زمان پیمایش موج از خاستگاه خود تا خروجی حوضه، به ازای هر رگبار تعریف نمود.

نکته مهمی که در این مورد باید بدان توجه نمود مسئله نحوه تعریف زمان تمرکز می‌باشد. مطابق تعریفی که در برخی مراجع آمده است زمان تمرکز، زمان حرکت قطره آب از دورترین نقطه نسبت به خروجی قلمداد می‌شود. ولی در واقع، زمان تمرکز مربوط به زمان انتقال اثر یک موج برخاسته از دورترین نقطه (از لحاظ هیدرولیکی) تا خروجی حوضه می‌باشد. از این دیدگاه زمان تمرکز حوضه معادل زمان تعادل حوضه در صورت وقوع بارش‌های طولانی می‌باشد.

برخی از روش‌های محاسبه زمان تمرکز و زمان پیمایش و اندازه‌گیری‌های صحرایی به کمک ردیاب[۸]، بر اساس حرکت قطرات آب بنا شده‌اند. به عنوان مثال Chow et al. (1988) زمان پیمایش را چنین تعریف می‌نماید:

$$t = \int_0^l \frac{dl}{v\,(l)} \qquad (۲)$$

که در آن l طول مسیر حرکت آب و v سرعت آن است.

Ponce (1989) علیرغم آنکه به امکان محاسبه زمان تمرکز بر اساس روش دقیق و توزیعی یعنی با استفاده زمان پیمایش موج سینماتیک اشاره می‌کند، در جایی دیگر زمان پیمایش را معادل طول

www.SID.ir

Archive of SID

جریان بخش بر سرعت تعریف می‌نماید. وی برای تعیین موقعیت خطوط همزمان پیمایش چنین می‌گوید:

"برای هر نقطه در داخل حوضه زمان پیمایش عبارت است از مدت زمانی که طول می‌کشد تا یک ذره آب[۹] از آن نقطه تا خروجی حوضه بپیماید."

Viessman (1989) نیز در تعریف زمان تمرکز چنین می‌گوید: "زمان تمرکز عبارت است از زمان لازم برای آن که با وقوع بارانی یکنواخت (مکانی) ، ۱۰۰ درصد حوضه در تشکیل رواناب در خروجی مشارکت نماید". واقعیت آن است که برخلاف مفهوم ارائه شده برای زمان تمرکز ، شرط لازم برای تحقق t_c ثابت بودن بارش در طول زمان است ولی بارش می‌تواند غیر یکنواخت مکانی باشد (Saghafian et al., 1995).

به اعتقاد Maidment (1993) ؛ شاید اولین بار در سال ۱۹۶۴ میلادی Laurenson برای تعریف زمان پیمایش با مورد کاربرد خاص در تعیین خطوط همزمان پیمایش از مفهومی دقیق استفاده کرده باشد: "به هر نقطه در حوضه می‌توان زمانی منحصر به فرد و خاص به عنوان اختلاف میان زمان رخداد مؤلفه‌ای از بارش خالص در آن نقطه و مشاهده اثر آن در خروجی نسبت داد. این فاصله زمانی همان زمان پیمایش نقطه مزبور می‌باشد". همچنین وی تأکید می‌کند که صحبت از قطره آب در این مقوله غیرمنطقی است، زیرا در زمان رخداد سیلاب، آب نه به عنوان مجموعه‌ای از قطرات آب بلکه به عنوان یک توده یکپارچه موجودیت پیدا می‌کند.

این تعاریف کلاسیک با تعریفی که برای هیدروگراف واحد حاصل از اعمال روش زمان–مساحت (هیدروگراف واحد کلارک) قابل استنباط است متفاوت می‌باشد (USGS, 2000). در این حالت t_c عبارت است از زمان میان انتهای بارش مؤثر تا نقطه عطف شاخه نزولی هیدروگراف. از دیدگاه هیدرولیکی نقطه عطف در شاخه نزولی هیدروگراف معرف زمانی است که دیگر جریان سطح‌الارضی[۱۰] به آبراهه اصلی حوضه وارد نشده و وظیفه تغذیه آن را برعهده ندارد. از این لحظه به بعد عرضهای هیدروگراف ناشی از زهکشی ذخیره موجود در آبراهه می‌باشند. براین اساس اگر t_c در تعاریف کلاسیک و متداول مربوط به زمان پیمایش اولین قطره از بارش مؤثر می‌باشد، زمان تمرکز کلارک، زمان پیمایش مورد نیاز برای آخرین قطره از بارش مؤثر در دورترین نقطه حوضه از نظر هیدرولیکی است تا خود را به آبراهه‌های اصلی برساند.

مؤلفین در این تحقیق سعی دارند باور دیرین حرکت امواج سیلاب به صورت حرکت قطرات آب را، که اساس تئوریک بسیاری از روشهای تولید ایزوکرون می‌باشد، با مفهوم حرکت امواج اصلاح نمایند.

۲- روش تحقیق

روشهای مختلف تعیین موقعیت خطوط همزمان پیمایش را عملاً می‌توان بر حسب تناسب زمان تعادل موج با توانهای مختلف طول پیمایش دسته بندی نمود. شایان ذکر است که هدف اصلی این تحقیق به عنوان یک کار پژوهشی پایه و تحلیلی، ایجاد مبانی مورد نیاز برای روش زمان – مساحت است که به شبیه‌سازی جریانهای سطح‌الارضی می‌پردازد. به اذعان بسیاری از مراجع و از جمله Singh (1996) برای شبیه‌سازی این نوع جریان‌ها تقریب موج سینماتیک از معادلات سنت ونان کافی است. بر این اساس به منظور تشخیص بهترین روش در مقایسه با روش تحلیلی(موج سینماتیک)، شاخه صعودی هیدروگراف به ازای بارشی واحد و یکنواخت از نظر زمانی و مکانی بر روی یک صفحه مستطیلی با شیب یکنواخت بدست آورده می‌شود. این پژوهش بر روی بارش خالص صورت می‌پذیرد و بدین لحاظ از نفوذپذیری، که تأثیری برروی نتیجه تحقیقات نخواهد داشت، صحبتی به میان نخواهد آمد.

برای تعیین میزان خطای اعمال روش زمان – مساحت در روش‌های مختلف تشکیل خطوط همزمان پیمایش نسبت به نتایج مدل موج سینماتیک، خطای نسبی بااستفاده از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$RE(t_k) = \frac{q(t_k) - q_{kw}(t_k)}{q_{kw}(t_k)} \qquad (۳)$$

که در آن:

RE = خطای نسبی

q = دبی حاصل از روش مورد استفاده

q_{kw} = دبی حاصل از اعمال مدل موج سینماتیک

t_k = زمان هیدروگراف

برای کار با روش زمان – مساحت می‌بایست در مرحله اول به استخراج موقعیت مکانی خطوط همزمان پیمایش در سطح حوضه پرداخت. در این ارتباط معمولاً از روشهای تجربی استفاده می‌شود که در ادامه به آنها اشاره خواهد شد. چون هدف این مقاله بررسی خطاهای هر یک از روش‌ها می‌باشد، ابتدا به چگونگی استفاده از روش تحلیلی موج سینماتیک برای یک هندسه ساده (صفحه مستطیلی) اشاره می‌شود و سپس سایر روش‌ها با روش تحلیلی مقایسه می‌گردند.

www.SID.ir

Archive of SID

رابطه تحلیلی موج سینماتیک به عنوان یکی از روش‌های تحلیل امواج از ساده‌سازی معادلات سنت ونان بدست می‌آید (Chow et al., 1988):

$$\frac{\partial Q}{\partial X}+\frac{\partial A}{\partial t}=q_l \qquad (۴)$$

$$\frac{1}{A}\frac{\partial Q}{\partial t}+\frac{1}{A}\frac{\partial}{\partial x}(\frac{Q^2}{A})+g\frac{\partial h}{\partial x}-g(S_0-S_f)=0 \qquad (۵)$$

معادله (۴) معادله پیوستگی و معادله (۵) معادله اندازه حرکت می‌باشد. در معادلات فوق Q دبی جریان، A مساحت جریان، q_l دبی جانبی، h عمق جریان، g شتاب ثقل، S_0 شیب کف کانال و S_f شیب خط انرژی می‌باشد. برای بدست آوردن معادلات موج سینماتیک می‌توان معادله اندازه حرکت سنت ونان را با حذف کلیه اجزا به غیر از S_0 و S_f به حد معادلات جریان‌های یکنواخت (نظیر معادله مانینگ) تنزل داد. از ترکیب این معادله و معادله پیوستگی یک معادله دیفرانسیل مرتبه اول و غیرخطی از نوع هیپربولیک بدست می‌آید (Ponce, 1991). برای بدست آوردن فرم مناسبی از موج سینماتیک باید از یک معادله معرف اصطکاک جریان که فرم کلی آن را می‌توان به صورت زیر نمایش داد استفاده نمود:

$$Q=\alpha A^{\beta} \qquad (۶)$$

در صورتی که برای معادله اصطکاک از معادله مانینگ استفاده شود ضرایب α و β در معادله فوق برابر خواهند شد با:

$$\alpha=\frac{1}{n}\frac{S_f^{1/2}}{P^{2/3}} \qquad (۷)$$
$$\beta=\frac{5}{3}$$

که در آن p محیط خیس شده، S_f شیب خط انرژی و n ضریب مانینگ می‌باشد.

اگر شدت بارش مؤثر "i" به عنوان دبی جانبی در نظر گرفته و معادلات برای جریان در واحد عرض (q) نوشته شود خواهیم داشت :

$$\frac{\partial q}{\partial x}+\frac{\partial h}{\partial t}=i \qquad (۸)$$

$$q=\alpha h^{\beta} \qquad (۹)$$

اگر از معادله (۹) برحسب h مشتق بگیریم (برای مقطع عریض با شرایط جریان یکنواخت)، خواهیم داشت:

$$\frac{\partial q}{\partial h}=\alpha\beta h^{\beta-1}=\beta(\frac{q}{h})=\beta.u=C \qquad (۱۰)$$

که در آن C سرعت موج سینماتیک است. با توجه به آنکه β همواره از یک بزرگتر است سرعت[11] حرکت موج سینماتیک بیشتر از متوسط سرعت جریان یکنواخت می‌باشد(Ponce,1989,Singh, 1996). با ضرب معادلات (۱۰)و (۸) در یکدیگر و تنظیم آن بر حسب h، معادله حاکم بر امواج سینماتیک بدست خواهد آمد :

$$\frac{\partial h}{\partial t}+C\frac{\partial h}{\partial x}=i \quad \text{و} \quad \frac{\partial q}{\partial t}+C\frac{\partial q}{\partial x}=Ci \qquad (۱۱)$$

بر اساس معادله (۱۰) موج سینماتیک باسرعت $\frac{dq}{dh}$ یا βu حرکت کرده و فروکشی[12] نخواهد داشت. ملاحظه می‌شود که q برای موجی که با سرعت $\frac{dq}{dh}$ در حرکت است نسبت به زمان بدون تغییر باقی می‌ماند (Ponce, 1989). بر این اساس می‌توان از این معادلات در هر روشی نظیر روش زمان – مساحت که بدون در نظر گرفتن دیفیوژن به شبیه‌سازی انتقال جریان می‌پردازد، استفاده نمود.

به منظور ادامه بحث یک صفحه مستطیلی که دارای طول L و شیب S_0 می‌باشد و در معرض بارانی مؤثر با شدت یکنواخت i و با مدت طولانی ($t_r > t_e$) قرار دارد در نظر گرفته می‌شود. بر اساس معادله (۱۱)، اگر t_0 مدت زمانی باشد که موج فاصله x_0 (از بالادست حوضه) را بپیماید و طول x_0 به تعادل برسد (جریان ماندگار حاکم شود– مفهوم زمان تعادل) می‌توان نوشت:

$$t_0=(\frac{x_0}{\alpha i^{\beta-1}})^{\frac{1}{\beta}} \qquad (۱۲)$$

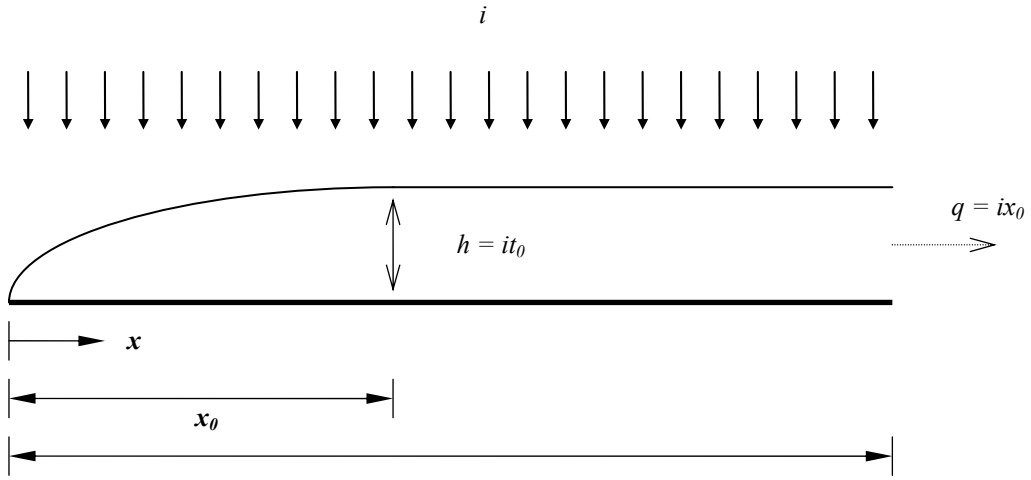
دبی جریان در فاصله x_0 و در لحظه t_0 مطابق شکل ۳ عبارت است از:

$$q_0=ix_0 \qquad (۱۳)$$

همانطوری که در شکل ۳ دیده می‌شود برای $x_0 \le x \le L$ یعنی بین نقطه مورد مطالعه تا خروجی، شرایط جریان غیر ماندگار ولی یکنواخت است و لذا در آن ناحیه برای ارتفاع جریان رابطه $h(x,t_0)=it_0$ و برای دبی واحد عرض رابطه $q(x,t_0)=\alpha(it_0)^{\beta}$ برقرار است.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۳ - پروفیل سطح آب در زمان $t=t_0$ بر روی صفحه مستطیلی تحت بارش مؤثر به شدت i

برای بدست آوردن خطوط همزمان پیمایش به هر تعداد دلخواه نظیر N، با استفاده از تئوری موج سینماتیک کافی است که در معادله (۱۱) برای زمان پیمایش مورد نظر مقدار x_o را بدست آورد. در این حالت خطوط همزمان پیمایش، خطوط متوالی با فاصله زمانی $\frac{t_e}{N}$ می‌باشد.

به عنوان مثال برای خط همزمان پیمایش jام، زمان پیمایش $t_0 = \frac{jt_e}{N}$ بوده و معادله (۱۱) برای $x_j=x_0$ حل خواهد شد. بدیهی است که شرایط هیدرولیکی جریان تا محل هر خط همزمان پیمایش از نوع ماندگار بوده و لذا می‌توان خطوط همزمان پیمایش بدست آمده را خطوط همزمان پیمایش ماندگار دانست.

با استخراج x_0 ازرابطه (۱۲) می‌توان نوشت:

$$x_0 = \alpha (t_0)^{\beta} i^{\beta-1} \qquad (۱۴)$$

با توجه به اینکه طول کل حوضه L در مدت t_e طی خواهد شدمی‌توان نوشت:

$$\frac{x_0}{L} = \frac{\alpha (t_0)^{\beta} i^{\beta-1}}{\alpha (t_e)^{\beta} i^{\beta-1}} \rightarrow x_0 = L(\frac{t_0}{t_e})^{\beta} \rightarrow$$

$$x_0 = L(\frac{j}{N})^{\beta} \qquad (۱۵)$$

فاصله هر دو هم پیمایش متوالی از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$l_j = x_j - x_{j-1} = L\left[\left(\frac{j}{N}\right)^{\beta} - \left(\frac{j-1}{N}\right)^{\beta}\right] ; 2 \le j \le N \qquad (۱۶)$$

در رابطه فوق $l_1 = x_1$.

بنابراین دبی جریان در زمان $t_k = \frac{kt_e}{N}$ برابر $q_{(tk)}=i(L-X_{N-k})$ خواهد بود. مشخص است که $(L-X_{N-k})$ معرف طول صفحه از بالادست تا پیشانی موج می‌باشد. برای محاسبه $q_{(tk)}$ در روش زمان- مساحت می‌توان از رابطه زیر استفاده نمود(Saghafian and Shokoohi, 2006)؛

(۱۷)

$$q_{(t_k)} = i \sum_{j=N}^{N-k+1} l_j = iL\left[1 - \left(\frac{N-k}{N}\right)^{\beta}\right] \quad \text{----} \quad 1 \le k \le N$$

همانطوری که قبلاً اشاره شد برای استخراج موقعیت خطوط همزمان پیمایش، روش‌های تجربی متعددی ابداع شده است که تعدادی از آنها کاربردهای وسیعی یافته‌اند. برخی از معروف‌ترین آنها دراین مقاله مورد مقایسه قرار می‌گیرند. در بررسی عمیق‌تر این روش‌ها و همچنین روش موج سینماتیک ملاحظه می‌گردد که می‌توان زمان پیمایش را بر حسب تناسب طول پیمایش با یک توان تعریف و تقسیم بندی نمود.

۱- روش سرعت‌های مساوی

روش سرعت‌های مساوی برای اولین بار توسط Pilgrim(1977) مطرح گردید که در آن هیستوگرام زمان – مساحت بر اساس فرض یکنواخت بودن سرعت در سراسر حوضه بدست می‌آید لذا می‌توان نوشت؛

$$t_w \propto l \qquad (۱۸)$$

که در آن t_w زمان پیمایش از هر نقطه تا خروجی حوضه به طول l می‌باشد. کلیه روش‌هایی که Maidment (1992,1993)، Ajward and Muzik (2000) و Melesse et al.(2003) توسعه

www.SID.ir

Archive of SID

داده‌اند، همچنین روشی که در حال حاضر به عنوان یک برنامه الحاقی در محیط ILWIS (GIS) فعال می‌باشد (Donker, 1993) از این روش استفاده به عمل می‌آورند.

۲- روش لاورنسن

فرض اساسی این روش آن است که زمان پیمایش برای هر نقطه در حوضه، با نسبت طول پیمایش به جذر شیب مسیر ($\frac{L}{S^{1/2}}$) تناسب دارد. از طرف دیگر شیب متوسط مسیر پیمایش برابر است با اختلاف ارتفاع تقسیم بر طول مسیر. بر این اساس می‌توان نوشت :

$$t_w \propto \frac{l}{\sqrt{S}} \rightarrow t_w \propto l^{1.5} \qquad (۱۹)$$

در این روش عملاً برای رسم خطوط همزمان پیمایش تعدادی نقطه روی خطوط توپوگرافی تعیین گردیده و طول زمان حرکت تا خروجی حوضه با نسبت $l^{1.5}$ رده بندی می‌شود. بر اساس این زمان نسبی می‌توان خطوط همزمان پیمایش را ترسیم نمود.

۳- روش تجربی مدل *HEC-1*

مدل HEC-1 دارای یک پیش فرض برای منحنی زمان – مساحت به صورت یک سهموی می‌باشد که در صورت عدم وجود اطلاعات می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. معادله منحنی مزبور به صورت زیر است:

$$A = 1.414t^{1.5} \quad \dots (0 \le t < 0.5) \qquad (۲۰)$$

$$A = 1 - 1.414(1-t)^{1.5} \quad \dots (0.5 \le t < 1) \qquad (۲۱)$$

که در آن A مساحت بدون بعد یعنی نسبت مساحت مورد نظر به مساحت کل حوضه و t زمان بدون بعد یعنی نسبت زمان تجمعی مربوط به مساحت مشارکت کننده در تأمین دبی در خروجی حوضه به زمان تمرکز حوضه می‌باشد. اگر معادلات فوق برای l در صفحه مستطیلی حل شوند می‌توان نوشت:

$$t_w \propto l^{0.67} \qquad (۲۲)$$

همان طوری که دیده می‌شود در روشهای مطرح شده ، t_w با توانی از l (طول پیمایش) متناسب می‌باشند. در ادامه بحث برای پوشش کلیه حالت‌های ممکن که سه نمونه از پرکاربردترین آنها مورد مطالعه واقع شدند، خطوط همزمان پیمایش برای طیفی از توان‌های طول پیمایش از ۰/۵ تا ۱/۵ بدست آمده و شاخه صعودی هیدروگراف محاسبه می‌شود. اگر تعداد کل خطوط همزمان پیمایش N و خط همزمان پیمایش مربوط به t_0 را با j نشان دهیم معادله (۱۶) موقعیت خطوط همزمان پیمایش را برای موج سینماتیک نشان می‌دهد. نظیر این رابطه را برای سایر توانهای l نیز میتوان نوشت:

$$t_w \propto l^{.5} \rightarrow X = L(\frac{j}{N})^2$$

$$t_w \propto l \rightarrow X = L(\frac{j}{N}) \qquad (۲۳)$$

$$t_w \propto l^{1.5} \rightarrow X = L(\frac{j}{N})^{2/3}$$

بر اساس روابط فوق موقعیت خطوط همزمان پیمایش برای انواع حالت‌ها محاسبه و در شکل ۴ نشان داده شده است. در این شکل جهت جریان مطابق شرایط واقعی جریان از بالا به پایین بوده و خطوط خط چین معرف ایزوکرون‌ها می‌باشند.

همانطوری که ملاحظه می‌گردد هر چه توان l کوچکتر باشد، به همان نسبت فاصله خطوط همزمان پیمایش در مسیر حرکت به سمت خروجی حوضه بیشتر می‌شود. در روش زمان – مساحت این امر بدان مفهوم است که هر چه توان l کوچکتر باشد مشارکت حوضه در تأمین جریان خروجی در ابتدای رگبار بیشتر از انتهای آن است.

۳- بررسی نتایج

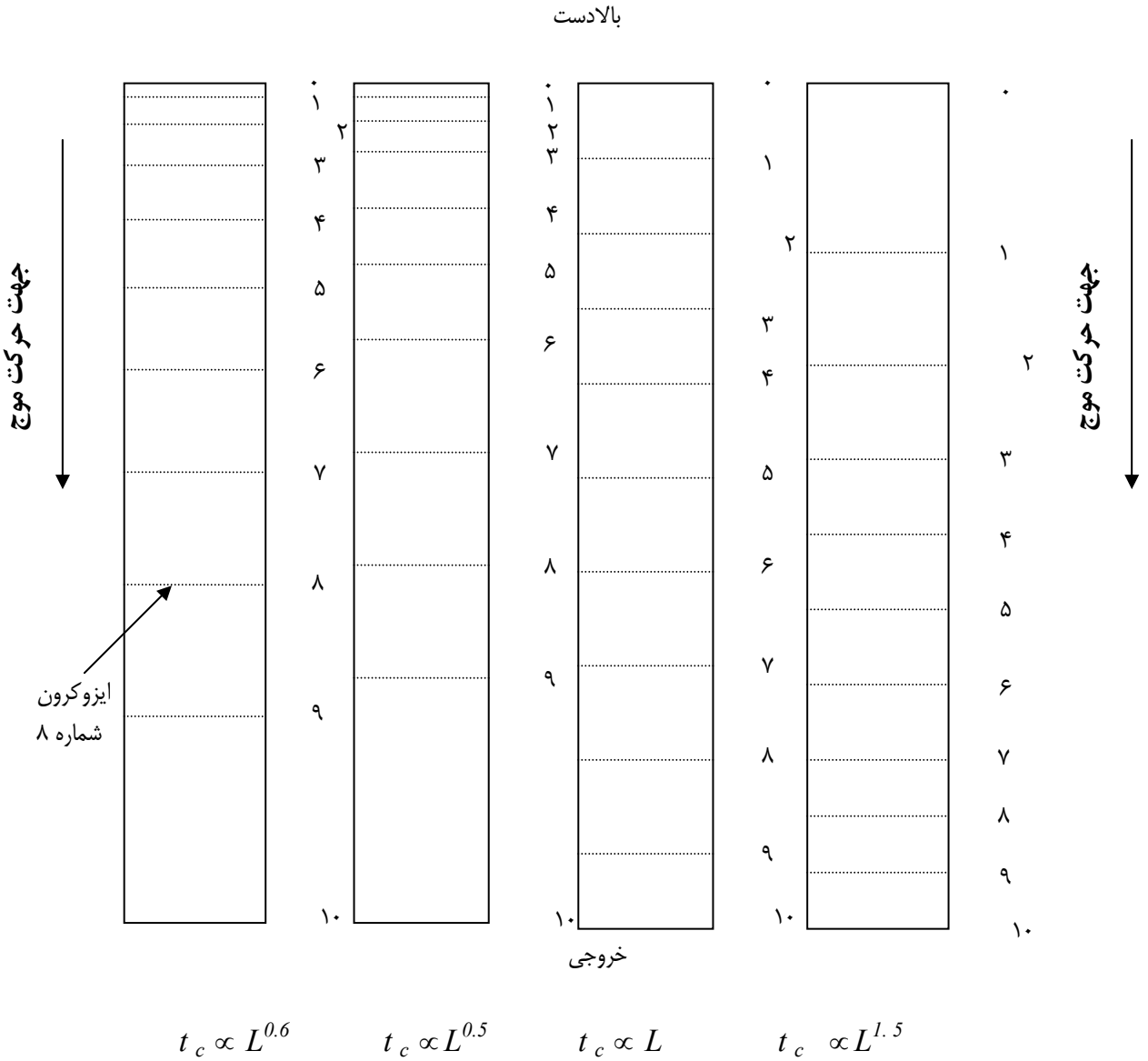
در این بخش با استفاده از خطوط همزمان پیمایش در روش‌های مختلف، شاخه صعودی هیدروگراف و خطای حاصل از هر روش در مقایسه با روش تحلیلی موج سینماتیک برای یک صفحه مستطیلی محاسبه خواهد شد.

برای رسم هیدروگراف حاصل از یک رگبارطولانی با شدت واحد که به صورت یکنواخت بر صفحه‌ای مستطیلی به عرض واحد می‌بارد، در ابتدا با استفاده از روابط (۲۳) موقعیت خطوط همزمان پیمایش استخراج می‌شوند و سپس در قالب روش زمان مساحت و معادله (۱۷)، دبی شاخه صعودی محاسبه می‌شود. نتیجه کار برای سه حالت تناسب زمان پیمایش با توانهای ۰/۵، ۱، ۱/۵ و روش موج سینماتیک در شکل ۵ آورده شده است. محور y هیدروگراف‌ها، دبی نسبی (نسبت به دبی تعادل (iL))و محور X نیز زمان نسبی (نسبت به زمان تعادل) را نشان می‌دهد. خطای نسبی در شکل ۶ نشان داده شده است.

همانطوریکه دیده می‌شود خطای نسبی روش‌ها در ابتدای بارش بیشتر است و در $t=t_e$ به صفر میرسد. با توجه به روند خطاها، نزدیکترین جواب به حالت تحلیلی را توان ۱/۵ بدست می‌دهد.

www.SID.ir

Archive of SID



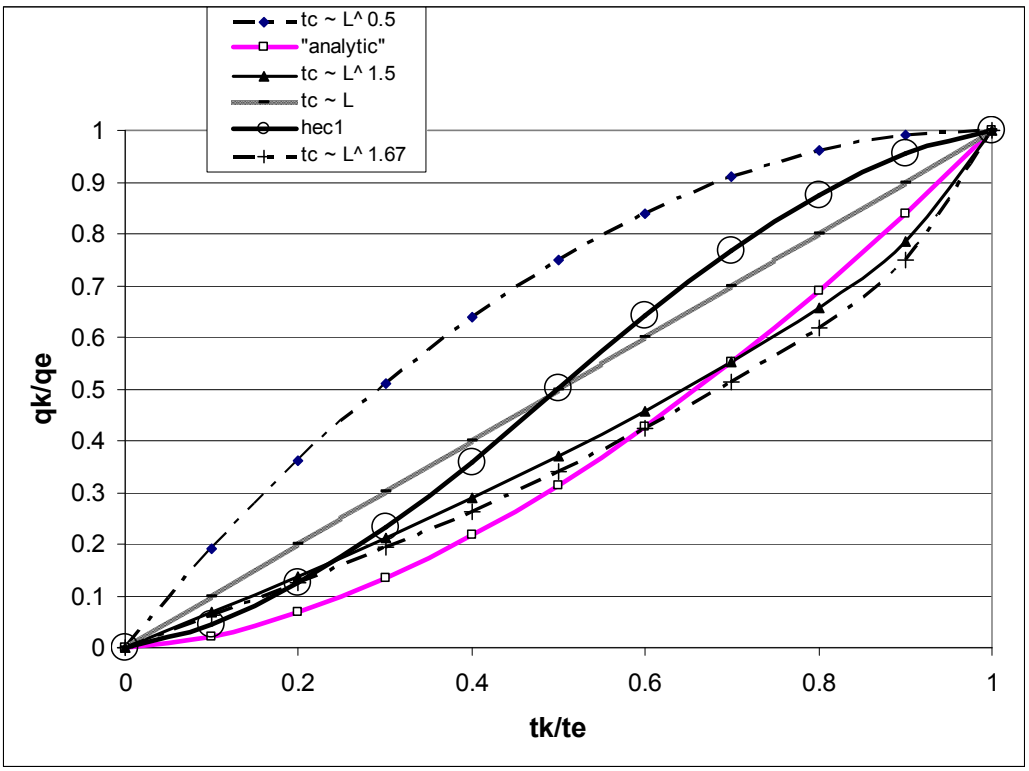
شکل ٤- نمایش موقعیت نسبی خطوط همزمان پیمایش در روش‌های مختلف(خروجی در پایین صفحه قرار دارد)

بررسی هیدروگراف حاصل از روش موج سینماتیک نشان می‌دهد که مجموع جریانی که به خروجی حوضه می‌رسد با گذشت زمان شدت بیشتری پیدا می‌نماید.

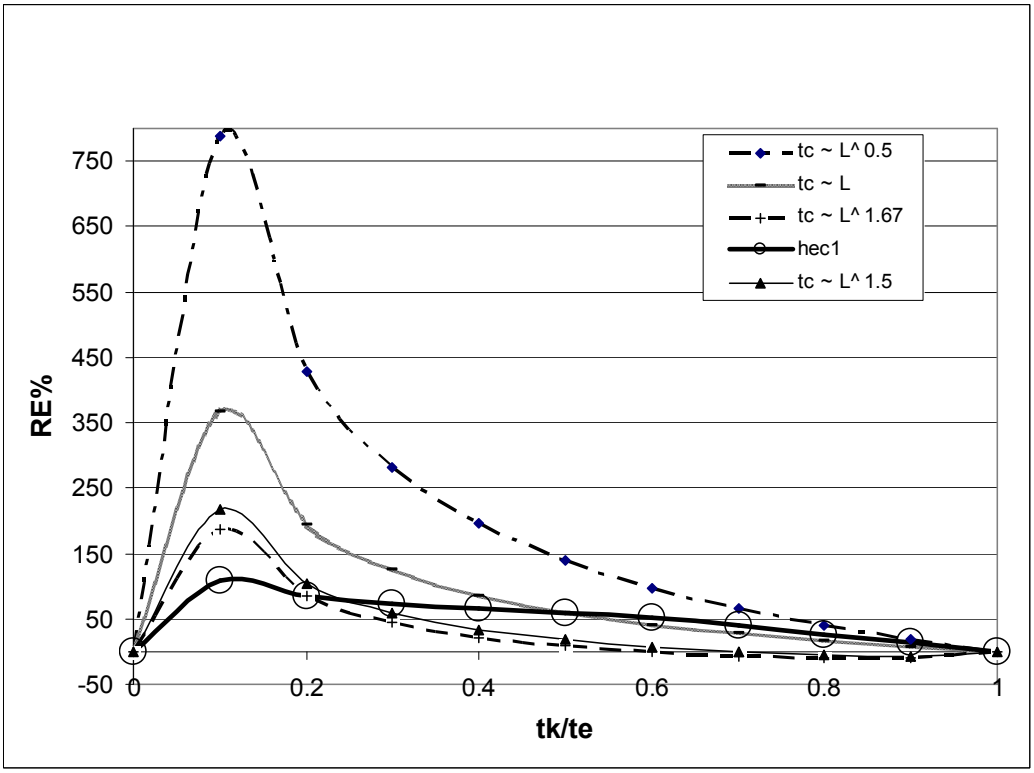
در ارتباط با روش زمان مساحت این امر بدان مفهوم است که مشارکت حوضه (مساحت تأمین کننده دبی) باید در ابتدا کم بوده و به تدریج بر مقدار آن اضافه شود. با توجه به آن که در روش زمان – مساحت برای تولید هیستوگرام زمان – مساحت، زیر مساحت‌ها به ترتیب از پایین به بالا (از خروجی حوضه به سمت بالادست) جمع می‌شوند، همانطوری که در شکل ۴ مشخص است توانی از l نزدیکترین جواب را به روش تحلیلی موج سینماتیک بدست خواهد داد که خطوط همزمان پیمایش واقع در نزدیکی خروجی کمترین فاصله را با هم داشته باشند. با این تفسیر انتظار می‌رود که کم دقت‌ترین جواب از روش $l^{0.5}$ و دقیق‌ترین جواب از $l^{1.5}$ بدست آید.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۵- مقایسه هیدروگراف حاصل از روش‌های مختلف تعیین خطوط همزمان پیمایش وروش تحلیلی موج سینماتیک بر مبنای روش زمان – مساحت



شکل ٦- خطای نسبی روش‌های مختلف تولید هم پیمایش نسبت به روش تحلیلی(موج سینماتیک)

www.SID.ir

Archive of SID

با توجه به نحوه محاسبه هیدروگراف سیلاب در روش زمان – مساحت، عملاً الگوی توزیع خطوط همزمان پیمایش معرف نحوه اثر الگوی زهکشی حوضه در تولید رواناب می‌باشد. بر این اساس، در صورتی که چیدمان ایزوکرونها بر اساس فیزیک قضیه و مطابق واقعیات، یعنی از بالادست حوضه به سمت پایین دست صورت گیرد، بر اساس الگوی بدست آمده (شکل ۴)، هر چه حرکت موج سیلاب به تئوری موج سینماتیک نزدیکتر باشد، در صورت استفاده از روش زمان – مساحت مشارکت حوضه در ابتدای رگبار خالص (بعد از اختتام و یا ناچیز شدن کاهش‌های هیدرولوژیکی) و قبل از رسیدن به نقطه عطف هیدروگراف در شاخه صعودی بیشتر و بعد از نقطه عطف، کمتر خواهد بود. این امر برای رگبار بلند مدت خالصی که به کل حوضه فرصت مشارکت در تأمین دبی خروجی حوضه را بدست می‌دهد، تناقضی آشکار با اصول هیدرولیکی قضیه دارد. واقعیت آن است که برای محاسبه دبی خروجی درکلیه روشهای محاسباتی، از اصل جمع آثار و انتگرال پیچش استفاده می‌شود (Bras, 1990, Chow et al., 1988). این امر به منزله آن است که مشارکت تجمعی حوضه بعد از نقطه عطف تا زمان رسیدن پاسخ کل بخش‌های مختلف حوضه به خروجی باید بیشتر از همین مشارکت در ابتدای رگبار باشد. بر این اساس شیب منحنی هیدروگراف در شاخه صعودی بعد از نقطه عطف بیشتر از همین شیب قبل از نقطه عطف می‌باشد. این امر برای روش‌هایی صادق خواهد بود که توان طول پیمایش بیشتر از ۱ باشد. شکل زنگوله‌ای و یا محدب برای توانهای کمتر از ۱ (شکل ۵)، نشاندهنده انحراف روش از اصول هیدرولیکی و هیدرولوژیکی حاکم بر قضیه می‌باشد. بر اساس نتایج این تحقیق، روش سرعت‌های مساوی که با وسعت زیاد در ارگان‌های مهم بین‌المللی در محیط GIS برای تعیین موقعیت ایزوکرون‌ها استفاده میشود، نتایج محاسبات را در معرض خطای جدی قرار می‌دهد. برای رفع این خطا مدل‌های توسعه یافته که مدل‌هایی توزیعی[۱۳] محسوب شده و در همه موارد با هدف جایگزینی مدل‌های یکپارچه[۱۴] نظیر هیدروگراف واحد و هیدروگراف واحد ژئومورفولوژیکی و ... توسعه یافته‌اند، برخلاف اصول اولیه مدل‌سازی توزیعی نیازمند واسنجی و ارزیابی عمده‌ای می‌باشند که با توجه به ماهیت مدل‌های مزبور کار را به عوض آسان شدن پیچیده‌تر می‌نماید (Beven,1985, Beven and O'Connell,1982).

٤- جمع بندی

۱- روش زمان – مساحت با استفاده از تشکیل هیستوگرام زمان – مساحت و ضرب آن در شدت رگباری که از نظر زمانی یکنواخت است به تولید هیدروگراف سیل مبادرت می‌ورزد. با توجه به آنکه با طریقه عمل در تولید هیدروگراف، دیفیوژن و فروکشی قابل لحاظ نمودن نیست، روش زمان – مساحت عملاً به نوعی حل عددی روش تحلیلی موج سینماتیک محسوب می‌شود.

۲- خطوط همزمان پیمایش در روش زمان – مساحت در واقع در هر لحظه معرف پیشانی موجی هستند که قبل از آنها جریان به حالت ماندگار رسیده است. از این رو خطوط مزبور را می‌توان خطوط همزمان پیمایش حالت ماندگار و زمان مرتبط با هر خط را زمان تعادل حوضه تا موقعیت آن خط دانست.

۳- در صورت یافتن روشی که بر مبنای پارامترهای فیزیوگرافیکی – هیدرولیکی حوضه بتواند موقعیت مناسبی را برای خطوط همزمان پیمایش تعریف نماید، روش زمان – مساحت می‌تواند جوابی نظیر روش تحلیلی موج سینماتیک بدست دهد.

۴- در صورت استفاده از جهت حرکت موج سیلاب از بالادست به سمت پایین دست برای چیدمان خطوط همزمان پیمایش، روش‌هایی که از توان کمتر از ۱ برای شبیه‌سازی هیدروگراف سیلاب استفاده می‌نمایند، سهم تجمعی حوضه در ابتدای رگبار تا زمان رسیدن به نقطه عطف در شاخه صعودی را بیش از مقدار واقعی و از نقطه عطف تا زمان رسیدن به نقطه اوج را بیش از مقدار واقعی برآورد می‌نمایند.

۵- در صورت استفاده از روش زمان – مساحت بهترین روش تجربی موجود برای تعیین موقعیت خطوط همزمان پیمایش و دیاگرام زمان – مساحت روش لاورنسن است که در آن $t_w \propto l^{1.5}$ میباشد. این امر برای اولین بار دقت بیشتر مدل‌هایی را که از این توان برای شبیه‌سازی طول پیمایش استفاده می‌نمایند به اثبات می‌رساند. در صورت استفاده از روش زمان – مساحت بهترین توان برای طول پیمایش $t_w \propto l^{1.67}$ می‌باشد که به نوعی برگرفته از تئوری موج سینماتیک می‌باشد. در این صورت جواب حاصل از روش زمان – مساحت بسیار نزدیک به جواب روش تحلیلی بوده و می‌توان این مدعا را پذیرفت که روش مزبور توانایی روندیابی امواج سطح‌الارضی در حد روشهای دارای پایه قوی هیدرولیکی را داراست.

۶- با توجه به وسعت روزافزون استفاده از روش زمان – مساحت، بررسی هر چه دقیق‌تر الگوریتم‌های موجود برای تأمین مهمترین پارامتر ورودی این روش یعنی موقعیت خطوط ایزوکرون، و ایجاد پایه‌های تئوریک مستحکم بر مبنای هیدرولیک جریانهای سطح‌الارض قطعی و با اهمیت به نظر می‌رسد. استفاده از نتایج این تحقیق برای کلیه مدلسازهایی که از روش زمان – مساحت بهره می‌گیرند، توصیه می‌شود.

www.SID.ir

Archive of SID

پی‌نوشت‌ها

1- Isochrones
2- Time – area Histogram; TAH
3- GIS
4- Deterministic direct hydraulic simulation
5- U.S. Army Corp of Engineers
6- Time to equilibrium
7- Time of concentration
8- Tracer
9- Parcel of water
10- Overland flow
11- Celerity
12- Attenuation
13- Distributed
14- Lumped

۵- مراجع

Ajward, M.H., Muzik, I., (2000), "A spatially varied unit hydrograph model", *J. of Environmental Hydrology*, Vol. 8, paper 7, pp. 1-8.

Beven, K.J. (1985), *Distributed Models In:* Hydrologic *Forecasting*, John Wiley & Sons Inc., New York, USA.

Beven, K.J., O'Connell, P.E., (1982),"On the role of distributed models in Hydrology", *Institute of Hydrology*, Report No. 81, Wallingford, UK.

Bras, R.L., (1990), *Hydrology, an introduction to* hydrologic *science*, Addition Wesley Publishing Co.

Chow, V.T., Maidment, D.R., and Mays, L.W.,(1988), *Applied Hydrology*, McGraw- Hill, International editions.

Donker, N.H.W.,(1993), "Automatic Extraction of Catchments Hydrologic Properties from Digital Elevation Data", *J. ITC,* Netherlands, pp. 22-30.

Hydrologic Engineering Center,(1991), HEC-1 flood hydrograph package, User's Manual.

Maidment, D.R.,(1992), *Grid-Based Computation of Runoff: A Preliminary assessment*, Hydrologic Engineering Center, US Army Corp Of Engineers, Davis, California

Maidment, D.R.,(1993), "Developing a spatially distributed unit hydrology using GIS", *Proc. HydroGIS 93*, Vienna, pp. 181-192.

Melesse, A.M., Graham, W.D., and Jordan, J.D. 2003, "Spatially distributed watershed mapping and modeling: GIS-based storm runoff response and hydrograph analysis: Part 2", *J. of Spatial Hydrology*, 3(2), pp. 1-28.

Pilgrim, D.H. (1977), "Isochrones of travel time and distribution of flood storage from a tracer study on a small watershed", *J. Water Resource Res.,* 13(3), pp. 587-595

Ponce, V.M., (1989), *Engineering Hydrology, Principle and Practice,* Prentice Hall

Saghafian, B., Julien, P.Y., and Ogden, F. L. (1995), "Similarity in catchments response, 1, stationary rainstorm", *J. Water Res. Research*, 31 (6), pp. 1533 – 1541

Saghafian, B, Shokoohi, A.R., (2006), "A corrected Time-Area Technique for One-Dimensional Flow" , *International Journal of Civil Engineering*, Vol. 4, No.1,
pp. 34-41.

Singh, V.P., (1996), *Kinematics Wave Modeling In Water Resources Engineering*, John Wiley & Sons Inc., New York, USA.

USGS, (2000), *Equations for estimating Clark Unit-Hydrograph Parameters for small Rural Watersheds in Illinois,* water resources investigation Report 00-4148.

Viessman, W., Lewis, G.L., and Knapp, J.W., (1989), *Introduction to Hydrology,* Harper Collins College Publishers.

تاریخ دریافت مقاله: ۲۸ تیر ۱۳۸۴
تاریخ اصلاح مقاله: ۲۹ شهریور ۱۳۸۵
تاریخ پذیرش مقاله: ۱ آبان ۱۳۸۵

www.SID.ir