

## در منابع طبیعی

# امکان کاربرد مدل موج سینماتیک در شبیه سازی آبدوی سطحی در عرصه های پخش سیلاب

● پیمان دانش کار آراسته، کارشناس ارشد آبیاری و زهکشی، مربی پژوهشی  
پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری

تاریخ دریافت: آذرماه ۱۳۸۰ تاریخ پذیرش: شهریور ماه ۱۳۸۲

### چکیده

مطالعه حاضر در راستای بررسی کارایی مدل موج سینماتیک در مطالعات و طراحی سیستمهای پخش سیلاب، در فاز آبدوی سطحی انجام شده است. بدین منظور مدل موج سینماتیک بررسی و برای شبیه سازی جریان در فاز پیشروی به کار گرفته شده است. در این ارتباط فرض گردید که عرصه های پخش سیلاب فاقد شیب جانبی بوده، جریان به صورت ورقه ای در امتداد شیب طولی اتفاق می افتد و بدین ترتیب می توان از معادلات یک بعدی جریان آب کم عمق برای شبیه سازی استفاده نمود. برای حل معادلات موج سینماتیک روش منقطع سازی قوطی پرایزمن انتخاب و به شیوه تکرار زمان حل گردید. برای صحت یابی سه مدل تحلیلی و جهت ارزیابی دو مدل عددی و داده های مشاهداتی مورد استفاده قرار گرفتند. از آنجا که از گسترش جریان ورقه ای بر عرصه های پخش سیلاب اطلاعات مدونی در دسترس قرار نداشت، اطلاعات مشاهده ای از ۳۱ نوار آبیاری مورد استفاده قرار گرفت. هفت مورد به دلیل عدم صدق فرض موج سینماتیک از تحلیل ها حذف و مابقی مورد استفاده قرار گرفتند. جمعاً پنج نوار آبیاری برای مراحل واسنجی و آنالیز حساسیت و ۱۹ نوار باقی مانده برای مرحله ارزیابی مورد استفاده قرار گرفتند. بررسی ها نشان دادند که مدل نسبت به گام زمان و ضریب وزنی زمان حساسیت ندارد. متوسط خطای نسبی و راندمان پیش بینی برای موارد شبیه سازی شده به ترتیب ۷/۸ و ۹۹/۴۵ درصد بدست آمد.

کلمات کلیدی، پخش سیلاب، مدل سازی ریاضی، موج سینماتیک، تفاضلات محدود، الگوی قوطی پرایزمن

Pajouhesh & Sazandegi No: 61 pp: 50-56

### Possibility of application of kinematic wave model to simulate overland flow on flood spreading plots

P.D. Arasteh, Member of Scientific Board of Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Tehran, Iran.

M.A. Banihashemi, Assistant Professor of Tehran University, Tehran, Iran.

This research was done to study the applicability of kinematic wave approach in design of flood spreading systems and simulation of overland flow over spreading plots. To this, kinematic wave model was studied and was used to simulate the advance phase. It was assumed that flood-spreading plots have no transversal slope and water flows down stream in direction of longitudinal slope as sheet flow. Therefore, one dimensional shallow water flow equation could be applied. Priesman box scheme with an iterative method for time adjusting was selected to discretize the governing equations. To verify and evaluation of the model, three analytical and two numerical models as well as observations were used, respectively. Unfortunately, there was no recorded information about flow on flood spreading plots, to evaluate the model. So, observed data of 31 borders were used to different modeling procedures. Seven borders were omitted from analyses for the lack of accuracy, because of non-kinematic behavior of them. Five borders were used for sensitivity analysis and calibration. The remaining 19 borders were used to evaluate the model. Analyses showed that the model has no sensitivity on time step and time weighting factor of Priesman box scheme. Average relative error and prediction efficiency were, 7.8 and 99.45 percent, respectively.

Keywords: Flood spreading, Mathematical modeling, Kinematic wave, Finite difference, Priesman box scheme

## مقدمه

پخش سیلاب بنا به تعریف عبارتست از انحراف تمامی یا بخشی از سیلاب و گسترش آن بر پهنه‌هایی که از پیش برای این منظور طراحی و احداث شده‌اند. طراحی سیستم‌های پخش سیلاب تا حدودی مبتنی بر ضوابط هیدرولیکی طراحی مجاری بدون پوشش است اما تا حدی نیز به سلیقه و تجربه طراح بستگی دارد. طراح بایستی ابعاد پهنه‌ها، طول مجاری، ارتفاع پشته‌ها و عرض دروازه‌ها را تعیین نماید که لازمه آن در دسترس بودن ضوابط و معیارهای طراحی سیستم پخش سیلاب است. از آنجا که تاکنون چنین معیارهایی تبیین نشده و یا اطلاعات صریحی در اختیار طراح قرار نمیدهد، ارزیابی طرح‌ها پیش از اجرای آنها ضرورت می‌یابد (ارزیابی طرح قبل از اجرا حتی در صورت وجود معیارهای دقیق نیز، ضروری است). مدلسازی ریاضی و عددی یکی از ابزارهایی است که این امکان را میدهد تا در سطح وسیع، با هزینه نسبتاً اندک و در مدت زمان کوتاه این ارزیابی صورت پذیرد. لذا در دنباله، مدلی عددی مبتنی بر مدل موج سینماتیک جهت شبیه‌سازی آبدوی سطحی بر عرصه‌های پخش در فاز پیشروی جریان به انتهای عرصه ارائه میگردد.

مدل موج سینماتیک کاربردهای وسیعی در مباحث مختلف هیدرولوژی و منابع آب دارد که ذیلاً برخی از آنها مورد بررسی قرار میگردد. Valiantzas و همکاران (۲۴) ضمن بررسی نحوه نفوذ در شیارهای آبیاری، با استفاده از مدل موج سینماتیک Walker و Skogerboe (۲۶) نسخه سال ۱۹۸۳، اقدام به شبیه‌سازی پیشروی جریان نمودند. از دیگر کاربردهای این مدل در علم آبیاری می‌توان به تحقیقات Smith (نقل از ۲۶)، Katopodes و Bassett (۹)، Strelkoff و همکاران (نقل از ۲۶)، Walker و Humpherys (Humpherys) و Rayej و Wallender (۱۵) اشاره کرد. در تحقیقات ذکر شده عموماً تکنیک‌های مختلفی از روش تفاضلات

## معادلات حاکم

پس از انحراف سیل از آبراهه اصلی و انتقال آن به ابتدای عرصه پخش توسط مجرای آبرسان، جریان در طول آبراهه گسترشی، پخش میگردد. پس از بالا آمدن سطح آب در آبراهه گسترشی، به پهنه پخش سیل پایین دست، سرریز مینماید. سپس آب در عرصه پخش در جهت شیب طولی عرصه براه افتاده تا به پشته انتهایی برسد و از طریق دروازه‌ها به مجرای گسترشی بعدی تخلیه گردد (شکل ۱). مقدماتی‌ترین فرض، فرض وجود عمق نرمال در سرآب عرصه پخش است. از آنجا که مجاری گسترشی در امتداد خطوط تراز یا با شیب‌های بسیار کم احداث میشوند، غالباً عرصه‌های پخش فاقد شیب جانبی بوده، تنها دارای شیب طولی میباشند. بنابراین فرض دوم نداشتن شیب جانبی در عرصه‌های پخش است. بدین ترتیب میتوان جریان را یک بعدی و در جهت شیب طولی عرصه فرض نمود.

جریان در عرصه‌های پخش به دلیل نفوذ در خاک از نوع متغیر مکانی است لذا این پدیده را با معادله نفوذ کوستیاکف-لوییس (Kostiakov-Lewis) بصورت یک بعدی در جهت قائم مدل می‌نماییم. جریان یک بعدی با سطح آزاد از معادلات St. Venant پیروی می‌نماید که شامل دو معادله بقای جرم و مومنتم می‌باشد. یکی از شیوه‌های حل این معادلات فرض موج سینماتیک یا

محدود و یا روش مشخصات و بصورت عددی اقدام به حل معادلات موج سینماتیک شده است. معمولاً معادلات منقطع شده منجر به یک سیستم معادلات ماتریسی می‌شود که بسته به نوع اسکیم عددی و شرایط اولیه و مرزی حاکم بر مسئله با الگوریتم‌های جاوی دو طرفه یا توماس که هر دو از روش‌های حل معادلات ماتریسی می‌باشند، حل می‌گردند.

Dholakia و همکاران (۷) با استفاده از حل معادلات تفاضلات محدود موج سینماتیک به روش Mac Cormak بصورت صریح اقدام به شبیه‌سازی جریان در یک سیستم آبیاری نواری نمودند. در این روش که مبتنی بر دو معادله پیشگو و اصلاحگر می‌باشد، عمق جریان سطحی بصورت صریح محاسبه میگردد و مشابه هر شیوه صریح دیگر نیازمند به برقراری شرط Courant برای دستیابی به همگرایی و پایداری می‌باشد.

مدل موج سینماتیک در مطالعات مهندسی رودخانه و جریانات آبراهه‌ای نیز کاربرد دارد که می‌توان به اقدامات حمادی و نوذری (۱)، Camarasa-Belmonte و Segura-Beltran (۴) و Knighton و Nanson (۱۰) اشاره نمود. در تحقیق اخیرالذکر از مدل موج سینماتیک برای یافتن زمان سیر حوزه استفاده شده است. انتقال رسوب نیز از دیگر زمینه‌های کاربرد مدل موج سینماتیک است که در این ارتباط می‌توان به تحقیقات Kothiyari و همکاران (۱۱) و Deletic (۶) اشاره کرد. در مدلسازی جریان سطحی در حوزه‌های آبریز نیز این روش کاربرد وسیعی یافته است که Young و همکاران (۲۹)، Saghafian و همکاران (۱۷)، Szymkiewicz (۲۲) و Rose و همکاران (۱۶) تحقیقاتی در زمینه‌های شبیه‌سازی هیدروگراف مصنوعی جریان سطحی و توسعه مدل‌های توزیعی بارش و رواناب در سطح حوزه‌های آبریز نموده‌اند.

جریان نرمال است. در این روش فرض می‌شود که جملات شتاب و گرادیان عمق جریان در معادله کلی مومنتم در مقابل سایر اجزای معادله قابل چشم پوشی میباشند و بدین ترتیب می‌توان جریان را یکنواخت فرض نمود. در مدل حاضر برای بیان جریان یکنواخت بجای معادلات عمومی شری و مانینگ از معادله نمایی Maheshwari و McMahon استفاده شده است (۱۳).

$$q = \alpha y^\beta s_0^{0.5} \dots (۱)$$

که در آن  $q$  = شدت جریان در واحد عرض،  $y$  = عمق جریان،  $s_0$  = شیب بستر،  $\alpha$  و  $\beta$  = ضرایب ثابت تابع شکل مقطع و جنس بستر می‌باشند.

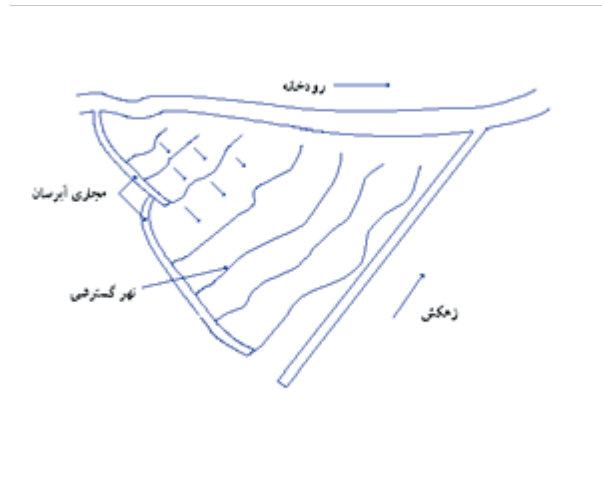
جهت حل عددی معادلات موج سینماتیک الگوی قوطی پرایزمن بر اساس مطالعات و پیشنهادات Walker و Humpherys (۲۵) و Walker و Skogerboe (۲۶)، Rayej و Wallender (۱۵)، انتخاب گردید اما بجای روش کاملاً ضمنی جاوی دوطرفه، روش حل مکانی با تکرار زمان Wallender و Yokokura مورد برنامه نویسی قرار گرفت (۲۷). الگوی مزبور یک روند عددی غیر خطی ضمنی است که پایداری نامشروط دارد (۲). همزمان با گسسته‌سازی و حل معادلات، شرط موج سینماتیک نیز

اشکال ۳ و ۲). در روشهای تحلیلی فوق الذکر معادلات موج سینماتیک با فرض ثابت بودن نرخ نفوذ (سرعت نفوذ)، معادلات اشتقاق یافته اند. به عبارت دیگر مدل نفوذ به صورت تابعی خطی از زمان در معادلات وارد شده است. در مرحله ارزیابی ۳۱ نوار آبیاری از اطلاعات Ram و Singh استخراج و مورد شبیه سازی قرار گرفتند (۱۳). جدول (۲) مشخصات هیدرولیکی این نوارها را نشان می دهد. در این میان در هفت نوار (ردیفهای ۲۳ تا ۲۹ از جدول ۲)، شیب اندک و عمق نرمال زیاد منجر به عدم صدق شرط لازم برای برقراری جریان سینماتیک و قابل استفاده نبودن مدل گردیدند که بدین لحاظ از بقیه مطالعه حذف شدند. دو نوار جدول (۱) و نوارهای ردیفهای (۱، ۹ و ۱۹) از جدول (۲) برای آزمون حساسیت مدل نسبت به گام و ضریب وزنی زمان بکار گرفته شدند. نتایج حاصله نشان داد که مدل در شبیه سازی منحنی پیشروی نسبت به دو عامل فوق الذکر حساسیت ندارد. در این ارتباط آزمون  $K^2$  نیز انجام پذیرفت که نشان می دهد در سطح ۹۹ درصد اختلافات معنی داری وجود ندارد (جدول ۳). نوارهای مزبور برای واسنجی و انتخاب بهترین گام و ضریب وزنی زمان از لحاظ دقت محاسبات و صرفه جویی در حافظه و افزایش سرعت محاسبات نیز مورد استفاده قرار گرفتند. برای انتخاب بهترین مقدار عوامل محاسباتی فوق الذکر، متوسط خطای نسبی مورد توجه قرار گرفت و بترتیب برای گام زمان و ضریب وزنی آن مقادیر ۶۰ ثانیه و ۰/۶ حاصل گشت. نتایج نشان داد که علی رغم عدم حساسیت مدل و پایداری روش در شبیه سازی منحنی پیشروی، افزایش گام زمان منجر به افزایش خطای نسبی متوسط می شود. آزمون  $K^2$  نشان داد که علی رغم کاهش خطای نسبی در مقابل کاهش گام زمان، در سطح ۹۹ درصد گام های زمان کمتر از ۶۰ ثانیه و در سطح ۹۵ درصد گام های زمانی کمتر از ۱۲۰ ثانیه اختلاف معنی داری ندارند (جدول ۴). اما رفتار ضریب وزنی زمان بگونه ای بود که روندی خاص و نتیجه ای صریح در مورد آن و نحوه اثر آن بر شبیه سازی بدست نیامد، گرچه در سطح احتمال ۹۹ درصد ضریب وزنی زمان کمتر از ۰/۶ و در سطح احتمال ۹۵ درصد مقادیر کمتر از ۰/۷ تفاوت معنی داری نشان ندادند (جدول ۵).

(۱) مشخصات هیدرولیکی جریان در نوارهای آبیاری در مرحله صحت یابی.

پارامتر	نمونه ۱ ×	نمونه ۲ ××
شدت جریان (cms/m)	۰/۰۰۵	۰/۰۰۵
عمق نرمال (m)	۰/۱۱۵	۰/۰۷
شیب بستر (m/m)	۰/۰۰۱۷	۰/۰۱
طول عرصه (m)	۱۲۱/۹۵	۱۲۵
ضریب زبری مانینگ	۰/۰۷	۰/۲۴
ضرایب معادله نفوذ $K, a, f$	$۰ \times 10^{-6}$ و $۷ \times 10^{-6}$	$۰ \times 10^{-5}$ و $۰ \times 10^{-5}$

× نقل از (۱۸) ×× نقل از (۲۳)



شکل (۱) طرحی نمادین از یک سیستم بخش سیلاب و اجزای آن

که عبارتست از عدد سینماتیک، کنترل می گردد.

$$K_0 = s_0 L y_0^{-1} F_r^{-2} \quad (2)$$

که در آن  $K$  = عدد سینماتیک،  $L$  = طول مسیر جریان،  $y_0$  = عمق در سرآب عرصه و  $Fr$  = عدد فرود می باشد.

لازم به ذکر است که Walker و Skogerboe (۲۴) به نقل از Woolhiser و Liggett تابع نرمال ساز  $K_0 < 50$  را شرط برقراری جریان سینماتیک دانستند اما طبق مطالعات Parlange و همکاران (۱۴)،  $K_0 < 40$  و مطابق بررسی های Singh و همکاران (۲۰) و Singh و Aravamuthan (۲۱)، شرط برقراری فرض سینماتیک تلقی شده است. در مدل حاضر عدد سینماتیک معادل ۵۰ از مطالعات Woolhiser و Liggett ملاک قرار گرفته است.

با توجه به شرط مزبور از آنجا که در عرصه های پخش سیلاب عموماً طول مسیر جریان بین ۱۰۰ تا ۳۰۰ متر و عمق جریان در سرآب عرصه ۵ تا ۳۰ سانتیمتر می باشد، در صورتی که شیب طولی بستر بیشتر از ۵ در هزار باشد، فرض موج سینماتیک صادق و مدل ارائه شده قابل کاربرد است. بنابراین هنگام طراحی پیشنهاد می گردد که جهت استفاده از مدل، طراح سعی نماید طول عرصه را به نحوی انتخاب کند که اختلاف ارتفاع دو سر آن از دو برابر عمق نرمال بیشتر باشد.

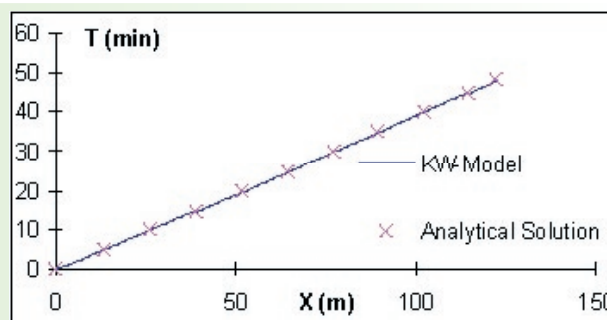
#### صحت یابی، ارزیابی و تحلیل حساسیت مدل

پس از مرحله گسسته سازی و حل معادلات بایستی اقدام به آزمون مدل توسعه یافته نمود. Niemeic و Chalfen پیشنهاد می نمایند که مدل های ریاضی جریان بوسیله پاسخ های تحلیلی صحت یابی شوند (۵). لذا سه مدل تحلیلی Sherman و Singh (۱۸) Weir (۲۸)، Turbak و Morel-Seytoux (۲۳) جهت صحت یابی مدل مورد استفاده قرار گرفتند که مقایسه نتایج مطابقت فوق العاده خوبی را نشان می دهد (جدول ۱ و

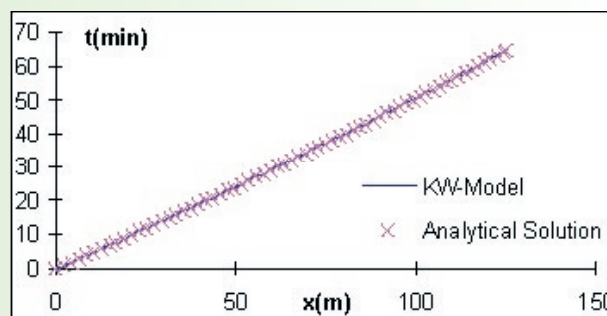
در نهایت راندمان پیش بینی Loague و Freeze (۱۲) نیز برای شبیه سازی زمان پیشروی به انتهای نوار محاسبه گردید و مقدار ۹۹/۴۵ درصد را کسب نمود. James و Burges (۸) شرط پذیرش مدل ها براساس راندمان پیش بینی را ۹۷ درصد اعلام نمودند که ملاحظه می شود در این ارتباط مدل ارائه شده از مطلوبیت بسیار خوبی برخوردار است.

### نتیجه گیری

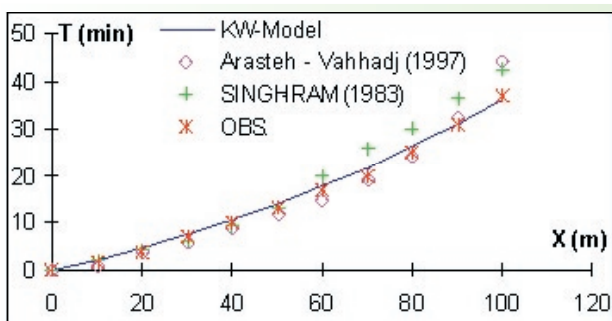
در این مطالعه معادلات موج سینماتیک یک بعدی برای شبیه سازی پیشروی جریان به انتهای عرصه پخش سیلاب بکار رفت. سپس شرط برقراری جریان سینماتیک و نکات طراحی مربوطه ارائه شد. معادلات حاکم بر جریان به کمک طرح عددی قوطی پرایزمن منقطع و بصورت ضمنی و با روش تفاضلات محدود با تکرار زمان حل گردید. جهت صحت یابی سه مدل تحلیلی بکار گرفته شدند که مقایسه نتایج، تطابق بسیار خوب مدل با راه حل های تحلیلی را نشان داد. برای ارزیابی مدل ۳۱ مورد مشاهده ای در نوارهای آبیاری که اطلاعات آنها در دسترس قرار داشت، به کار گرفته شدند، که در هفت مورد به دلیل صادق نبودن فرض موج سینماتیک نتایج مناسبی به دست نیامد و این هفت مورد از بررسی ها حذف گردیدند. برای پنج نوار آبیاری مراحل تحلیل حساسیت



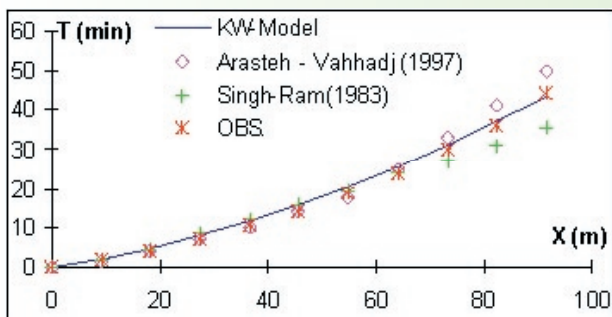
شکل (۲) صحت یابی مدل موج سینماتیک با مدل تحلیلی Singh و Sherman برای نمونه (۱) از جدول (۱).



شکل (۳) صحت یابی مدل موج سینماتیک با مدل تحلیلی Weir و مدل تحلیلی Turbak و Morel-Seytoux برای نمونه (۲) از جدول (۱).



شکل (۴) ارزیابی مدل موج سینماتیک با مدل Singh و Ram و مدل Arasteh و Vahhadj برای ردیف (۲) از جدول (۲).



شکل (۵) ارزیابی مدل موج سینماتیک با مدل Singh و Ram و مدل Arasteh و Vahhadj برای ردیف (۲۰) از جدول (۲).

عامل دیگری که مورد توجه قرار گرفت نحوه تغییرات خطای نسبی در طول نوار بود. ملاحظه گردید که در اولین گام زمان که بصورت صریح محاسبه می شود، خطای نسبی زیاد و بتدریج در گام های زمانی بعدی با توجه به پایداری و همگرایی روش از مقدار آن کاسته می شود و بسته به شرایط هیدرولیکی جریان در فاصله معینی به حداقل خود می رسد. پس از این فاصله به بعد مجدداً افزایش می یابد. لذا نتیجه گیری شد که مدل نسبت به طول جریان حساس است و علی رغم تأمین شرط سینماتیک، دقت محاسبات کاهش می یابد. لذا هنگام طراحی بایستی به این نکته کاملاً توجه داشت.

پس از صحت یابی، تحلیل حساسیت و واسنجی، برای ارزیابی مدل از ۱۹ نوار باقی مانده و مدل های عددی Singh و Ram (۱۹) و Arasteh و Vahhadj (۳) استفاده شد. مدل های مزبور بترتیب از نوع مدل های نیمه تحلیلی-عددی و نیمه ضمنی می باشند. مقایسه نتایج مطابقت بهتر روش ارائه شده را در تمامی ۱۹ مورد نشان می دهد. در این مرحله دامنه تغییرات خطای نسبی بین ۳/۲ تا ۱۶/۵ درصد متغیر بود و خطای نسبی متوسط ۷/۸ درصد تعیین گردید. اشکال (۵ و ۴) نتایج شبیه سازی و مقایسه آن با مدل های مزبور را بعنوان نمونه برای نوارهای ردیف (۲ و ۲۰) از جدول (۲) نشان می دهند.

جدول (۲) اطلاعات طراحی برای نوارهای آبیاری (۱۹).

ردیف	$q_0$ (CMS/m)	$S_0$ (m/m)	$n_m$	پارامتر $L$ (m)	$k$ (m/s <sup>a</sup> )	$a$	$f_0$ (m/s)
۱	۰/۰۰۲۶۶	۰/۰۰۵	۰/۰۵۹	۱۰۰	۰/۰۰۰۳۸۳	۰/۵۶۷	.
۲	۰/۰۰۲	۰/۰۰۵	۰/۰۶۶	۱۰۰	۰/۰۰۰۴۲۹	۰/۵۷۴	.
۳	۰/۰۰۱۳۳	۰/۰۰۵	۰/۰۴۸	۱۰۰	۰/۰۰۰۴۱۱	۰/۵۹	.
۴	۰/۰۰۲۶۶	۰/۰۰۳	۰/۰۷۷	۱۰۰	۰/۰۰۰۴۰۲	۰/۶۰۵	.
۵	۰/۰۰۲	۰/۰۰۳	۰/۰۹۲	۱۰۰	۰/۰۰۰۴۱۸	۰/۵۸۸	.
۶	۰/۰۰۱۳۳	۰/۰۰۳	۰/۱	۱۰۰	۰/۰۰۰۲۹۱	۰/۶۱۵	.
۷	۰/۰۰۲۶۶	۰/۰۰۱	۰/۰۸	۱۰۰	۰/۰۰۰۲۳۸	۰/۶۹	.
۸	۰/۰۰۲	۰/۰۰۱	۰/۰۷۱	۱۰۰	۰/۰۰۰۱۹۶	۰/۶۹	.
۹	۰/۰۰۱۳۳	۰/۰۰۱	۰/۰۷۳	۱۰۰	۰/۰۰۰۷۲۸	۰/۵۲۷	.
۱۰	۰/۰۰۲۶۶	۰/۰۰۵	۰/۱۱۴	۱۰۰	۰/۰۰۰۳۴۷	۰/۶۲	.
۱۱	۰/۰۰۲	۰/۰۰۵	۰/۱۳۲	۱۰۰	۰/۰۰۰۲۷۳	۰/۶۳	.
۱۲	۰/۰۰۱۳۳	۰/۰۰۵	۰/۱۵۴	۱۰۰	۰/۰۰۰۵۹۸	۰/۵۳۳	.
۱۳	۰/۰۰۲۶۶	۰/۰۰۳	۰/۱۱۷	۱۰۰	۰/۰۰۰۲۴۷	۰/۶۷۴	.
۱۴	۰/۰۰۲	۰/۰۰۳	۰/۱۴۵	۱۰۰	۰/۰۰۰۳۴۷	۰/۶	.
۱۵	۰/۰۰۱۳۳	۰/۰۰۳	۰/۱۸۸۷	۱۰۰	۰/۰۰۰۶۸۷	۰/۵۳۳	.
۱۶	۰/۰۰۲۶۶	۰/۰۰۱	۰/۱۴۶	۱۰۰	۰/۰۰۰۳۰۲	۰/۶۴	.
۱۷	۰/۰۰۲	۰/۰۰۱	۰/۱۱۶	۱۰۰	۰/۰۰۰۲۰۲	۰/۶۹	.
۱۸	۰/۰۰۱۳۳	۰/۰۰۱	۰/۱۳	۱۰۰	۰/۰۰۰۴۱۹	۰/۵۸۵	.
۱۹	۰/۰۰۱۷۵۵	۰/۰۰۱	۰/۰۱۷	۹۱/۴۶	۰/۰۰۰۱۵۳	۰/۴۴۱	.
۲۰	۰/۰۰۲۴	۰/۰۰۱	۰/۰۳۵	۹۱/۴۶	۰/۰۰۰۳۴۸	۰/۳۳۶	.
۲۱	۰/۰۰۳۳۵	۰/۰۰۱۱	۰/۰۲۶	۹۱/۴۶	۰/۰۰۱۵۵	۰/۱۱	.
۲۲	۰/۰۰۲۴۳	۰/۰۰۱	۰/۰۲۹	۹۱/۴۶	۰/۰۰۰۶۲۵	۰/۲۵۷	.
۲۳	۰/۰۰۵۰۲	۰/۰۰۰۱۷	۰/۰۷	۱۲۱/۹۵	۰/۰۰۰۴۲۸	۰/۲۴۲	.
۲۴	۰/۰۰۳۴۴	۰/۰۰۰۲	۰/۱	۱۸۲/۹۳	۰/۰۰۰۵۴	۰/۲۵۹	.
۲۵	۰/۰۰۵۱	۰/۰۰۰۳۸	۰/۱۳۶	۲۱۳/۴۱	۰/۰۱۰۷۸	۰/۱۵۱	.
۲۶	۰/۰۰۳۷۲	۰/۰۰۰۳۸	۰/۱۹۱	۱۶۷/۶۸	۰/۰۰۰۳۹۳	۰/۳۰۶	.
۲۷	۰/۰۰۵۳۹	۰/۰۰۰۶۴	۰/۱۳۲	۲۱۳/۴۱	۰/۰۰۰۱۴	۰/۴۲۸	.
۲۸	۰/۰۰۷۶۲	۰/۰۰۰۷۵	۰/۰۸	۲۳۱/۴۱	۰/۰۰۰۲۰۸	۰/۳۳۴	.
۲۹	۰/۰۰۵۶۷	۰/۰۰۰۹۷	۰/۱۸۲	۱۸۲/۹۳	۰/۰۰۰۷۴۱	۰/۲۲۴	.
۳۰	۰/۰۰۵۴۸	۰/۰۰۰۴۹۶	۰/۲۲	۲۳۱/۴۱	۰/۰۱۱۳	۰/۱۶۱	.
۳۱	۰/۰۰۶۳۲	۰/۰۰۰۴۹۶	۰/۱۹	۲۳۱/۴۱	۰/۰۰۰۸۵۶	۰/۲۸	.

لازم به ذکر است که مدل موج سینماتیک حاضر براساس فرضیات متعددی توسعه یافته است که هنگام کاربرد، بایستی به آنها توجه نمود و مدل را در محدوده کارایی خود مورد استفاده قرار داد. متأسفانه به دلیل عدم دسترسی به اطلاعات مورد نیاز در عرصه های پخش سیلاب، مدل برای شرایط واقعی عرصه های پخش ارزیابی نگردید. لذا پیشنهاد می گردد که برای ثبت رفتار موج در عرصه های پخش سیلاب اقدام به تجهیز امکانات و اندازه گیری های لازم نمود و سپس نتایج اندازه گیری را با نتایج مدل مقایسه کرد.

#### منابع مورد استفاده

۱- حمادی، ک. و نوذریان ل. ۱۳۸۱. تعیین پارامترهای مدل موج

و واسنجی انجام شد و آزمون های آماری مربوطه نیز صورت گرفت. پس از مراحل صحت یابی، آنالیز حساسیت و واسنجی، ارزیابی مدل برای ۱۹ نوار باقی مانده انجام پذیرفت که در این مرحله مدل انطباق خوبی با مشاهدات نشان داد. خطای نسبی متوسط تغییراتی از ۳/۲ تا ۱۶/۵ درصد، با میانگین ۷/۸ درصد را نشان داد. مدل موج سینماتیک ضمنی ارائه شده با دو مدل عددی دیگر نیز مقایسه گردید و نشان داد که مدل حاضر از دقت بیشتری برخوردار است. راندمان پیشبینی نیز معادل ۹۹/۴۵ درصد محاسبه گردید که نشان دهنده راندمان پیش بینی فوق العاده مناسب مدل برای ۲۴ نوار مورد مطالعه و عرصه هایی با خصوصیات مشابه می باشد.



جدول (۳) آزمون  $K^2$  برای تحلیل حساسیت مدل نسبت به گام و ضریب وزنی زمان.

پارامتر	شماره نوار	تعداد رده	درجه آزادی	$K^2$ مشاهده شده	$K^2$ $\alpha = 0,0$	$K^2$ $\alpha = 0,0$
ضریب وزنی زمان	نمونه ۱ جدول ۱	۶	۴	۰/۲۶۶	۰/۲۹۷	۰/۷۱۱
	نمونه ۲ جدول ۱	۶	۴	۰/۰۰۷	۰/۲۹۷	۰/۷۱۱
	ردیف ۱ جدول ۲	۶	۴	۰/۲۲۳	۰/۲۹۷	۰/۷۱۱
	ردیف ۹ جدول ۲	۶	۴	۰/۰۱۹	۰/۲۹۷	۰/۷۱۱
	ردیف ۱۹ جدول ۲	۶	۴	۰/۱۷۶	۰/۲۹۷	۰/۷۱۱
گام زمان	نمونه ۱ جدول ۱	۸	۶	۰/۴۷۷	۰/۸۷۲	۱/۶۳۵
	نمونه ۲ جدول ۱	۸	۶	۰/۰۰۵۸	۰/۸۷۲	۱/۶۳۵
	ردیف ۱ جدول ۲	۸	۶	۰/۷۴۳	۰/۸۷۲	۱/۶۳۵
	ردیف ۹ جدول ۲	۸	۶	۰/۵۴۱	۰/۸۷۲	۱/۶۳۵
	ردیف ۱۹ جدول ۲	۸	۶	۰/۱۳۰	۰/۸۷۲	۱/۶۳۵

جدول (۴) آزمون  $K^2$  برای واسنجی گام زمان.

گام زمان min	تعداد رده	درجه آزادی	$K^2$ مشاهده شده	$K^2$ $\alpha = 0,01$	$K^2$ $\alpha = 0,05$
۱۰	۱۰	۸	۰/۰۰۶	۱/۶۴۶	۲/۷۳۳
۲۰	۱۰	۸	۰/۰۱۶	۱/۶۴۶	۲/۷۳۳
۳۰	۱۰	۸	۰/۰۳۲	۱/۶۴۶	۲/۷۳۳
۶۰	۱۰	۸	۰/۱۱۶	۱/۶۴۶	۲/۷۳۳
۱۲۰	۱۰	۸	۱/۶۸۹	۱/۶۴۶	۲/۷۳۳
۱۸۰	۱۰	۸	۴/۷۱۳	۱/۶۴۶	۲/۷۳۳
۲۴۰	۱۰	۸	۱۲/۱۹۳	۱/۶۴۶	۲/۷۳۳
۳۰۰	۱۰	۸	۱/۸۹۱	۱/۶۴۶	۲/۷۳۳

Hydrology, 86: 1-13.

6- Deletic, A., 2001. Modelling of water and sediment transport over grassed areas. Journal of Hydrology, 248: 168-182.

7- Dholakia, M., Misra, R. and Zaman, M.S., 1998. Simulation of border irrigation system using explicit MacCormack finite difference method". Agricultural Water Management, 36: 181-200.

8- James, L.D., and Burges, S.J., 1982. "Selection Calibration and testing of hydrologic models, in Hydrologic Modeling of Small Watersheds. Eds. by Haan, C.T., Johnson H.P., and Brakensiek, D.L., ASAE, 437-472.

9- Katopodes, N.D., and Strelkoff, T., 1977. "Dimensionless solution of border irrigation advance. ASCE Journal of

سینماتیک رودخانه مارون". مجموعه مقالات ششمین سمینار بین المللی مهندسی رودخانه. ۳۶۷-۳۸۴.

۲- دانش کار آراسته، پ. ۱۳۸۱. "شبیه سازی شبه دو بعدی جریان آب کم عمق در یک سیستم پخش سیلاب. گزارش نهایی طرح تحقیقاتی. پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری. ۷۸ صفحه.

3- Arasteh, P.D., and Vahhadj, S.R., 1997. Mathematical modeling of shallow water flow in a flood spreading System". Proc. of the 8th International Conference on Rain Water Catchment Systems. 173-181.

4- Camarasa-Belmonte, A.M. and Segura-Beltran, F., 2001. Flood event in mediterranean ephemeral streams in Valencia region, Spain. Catena, 45: 229-249.

5- Chalfen, M., and Niemiec, A., 1986. Analytical and numerical solution of Saint-Venant equations. Journal of

جدول (۵) آزمون  $K^*$  برای واسنجی ضریب وزنی زمان.

$K^*$ $\alpha = 0.05$	$K^*$ $\alpha = 0.01$	$K^*$ مشاهده شده	درجه آزادی	تعداد رده	ضریب وزنی زمان
0.711	0.297	0.0003	4	6	0.5
0.711	0.297	0.116	4	6	0.6
0.711	0.297	0.733	4	6	0.7
0.711	0.297	1.285	4	6	0.8
0.711	0.297	2.383	4	6	0.9
0.711	0.297	3.823	4	6	1.0

Irrigation and Drainage Engineering, 103(4): 401-407.

10- Knighton, A.D. and Nanson, G.C., 2001. An event based approach to the hydrology of arid zone rivers in the channel country of Australia. Journal of Hydrology, 254: 102-123.

11- Kothyari, U.C., Tiwari, A.K. and Singh, R., 1997. Estimation of temporal variation of sediment yield from small catchments through the kinematic method. Journal of Hydrology, 203:39-57.

12- Loague, K.M., and Freeze, R.A., 1985. A comparison of rainfall-runoff modeling techniques on small upland catchments. Water Resources Research, 21(2): 229-248.

13- Maheshwari, B.L., and McMahon, T.A., 1992. Modeling shallow overland flow in surface irrigation. ASCE Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 118(2): 201-217.

14- Parlange, J.Y., Hogarth, W.L., Sander, G., Rose, C.W., Haverkamp, R., Surin A., and Brutsaert, W., 1990. Asymptotic expansion for steady state overland flow. Water Resources Research, 26(4): 579-586.

15- Rayej, M., and Wallender, W.W., 1988. Time solution of kinematic-wave model with stochastic infiltration". ASCE Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 114(4): 605-621.

16- Rose, C.W., Hogarth, W.L., Ghadiri, H., Parlange, J.Y. and Okom, A., 2002. Overland flow to and through a system of uniform resistance. Journal of Hydrology, 255: 134-150.

17- Saghafian, B., Julien, P.Y. and Rajaie, H., 2002. Runoff hydrograph simulation based on time variable isochrone. Journal of Hydrology, 261: 193-203.

18- Sherman, B., and Singh, V.P., 1982. A kinematic model for surface irrigation: an extension. Water Resources Research, 18(3): 659-667.

19- Singh, V.P., and Ram, R.S., 1983. A kinematic model for surface irrigation: Verification by Experimental Data. Water Resources Research, 19(6): 1599-1612.

20- Singh, V.P., Aravamuthan, V., and Joseph, E.S 1993. Accuracy of hydrodynamic models of flood-discharge determinations. in Environmental Management, Geo-Water & Engineering Aspects. Eds. Chowdhury and Sivakumar, Balkema Publishing INC., 79-89.

21- Singh, V.P. and Aravamuthan, V., 1996. Errors of kinematic wave and diffusion wave approximations for Steady state overland flows". Catena, 27: 209-227.

22- Szymkiewicz, R., 2002. An alternative IUH for the hydrological lumped models. Journal of Hydrology, 259: 246-253.

23- Turbak, A.S., and Morel-Seytoux, H.J., 1988. Analytical solution for surface irrigation, I: Constant Infiltration Rate. ASCE Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 114(1): 31-47.

24- Valiantzas, J.D., Aggelides, S. and Salsalou, A., 2001. Furrow infiltration estimation from time to a single advance point" Agricultural Water Management, 52: 17-32.

25- Walker, W.R., and Humpherys, A.S., 1983. Kinematic-wave furrow irrigation model. ASCE Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 109(4): 377-392.

26- Walker, W.R., and Skogerboe, G.V., 1987. Surface irrigation. Prentice-Hall INC.

27- Wallender, W.W., and Yokokura, J., 1991. Space solution of kinematic-wave model by time filtration. ASCE Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 117(1): 140-144.

28- Weir, G.J., 1983. A mathematical model for border strip irrigation. Water Resources Research, 19(5): 1011-1018.

29- Young, M.D.B., Gowing, J.W., Wyseure, G.C.L. and Hatibu, N., 2002. Parched thirst: Development and validation of a process based model of rain water harvesting. Agricultural Water Management, 55: 121-140.