

# درونیابی مبتنی بر توابع پایه شعاعی و نداشت داده‌های ناقص تداوم بارندگی

حسن درخشان<sup>۱</sup>

ناصر طالب بیدختی<sup>۲</sup>

(دریافت ۸۹/۷/۲۰ پذیرش ۸۹/۱۱/۶)

## چکیده

یکی از روشهای تکمیل داده‌های ناقص، روش درونیابی مبتنی بر توابع پایه شعاعی است. برای این منظور از پنج روش درونیابی برای تکمیل داده‌های تداوم بارندگی حوزه رودخانه پارامتا در سیدنی استرالیا استفاده گردید و برای یافتن روش مناسب درونیابی، ضریب شکل C طی یک روش اعتبارسنجی جانبی، بهینه‌یابی شد. با این ضریب تأثیر شکل خاص، تفاوت میزان به دست آمده برای تداوم بارندگی از رگبار شماره ۱ در ایستگاههای مختلف از طریق اعتبارسنجی جانبی و میزان مشاهده شده آن، محاسبه شد. به منظور بررسی دقت روش تخمین از روشهای کنترل آماری سه‌گانه خطای متوسط نرمال، درصد متوسط خطای تخمین و مربع ضریب همبستگی بین مقدار محاسبه شده و مقدار مشاهده شده، استفاده گردید. نتایج تحقیق نشان داد که روش درونیابی مالتی کوادریک با کمترین خطا، بهترین روش درونیابی برای تکمیل داده‌های ناقص تداوم بارندگی است.

**واژه‌های کلیدی:** توابع پایه شعاعی، نداشت تداوم بارندگی، ضریب شکل، اعتبارسنجی جانبی

## Radial Basis Function (RBF) Interpolation and Investigating its Impact on Rainfall Duration Mapping

Hassan Derakhshan<sup>1</sup>

Naser Talebbeydokhti<sup>2</sup>

(Received Oct. 11, 2010 Accepted Jan. 25, 2011)

### Abstract

The missing data in database must be reproduced primarily by appropriate interpolation techniques. Radial basis function (RBF) interpolators can play a significant role in data completion of precipitation mapping. Five RBF techniques were engaged to be employed in compensating the missing data in event-wised dataset of Upper Paramatta River Catchment in the western suburbs of Sydney, Australia. The related shape parameter, C, of RBFs was optimized for first event of database during a cross-validation process. The Normalized mean square error (NMSE), percent average estimation error (PAEE) and coefficient of determination ( $R^2$ ) were the statistics used as validation tools. Results showed that the multiquadric RBF technique with the least error, best suits compensation of the related database.

**Keywords:** Radial Basis Function, Rainfall Duration Mapping, Shape Function, Cross Validation.

1. Assist. Prof. of Civil Eng., Dept. of Eng., Zabol University, Zabol  
(Corresponding Author) (+98 542) 2222605 derakhsh@gmail.com

2. Prof., Dept. of Civil Eng., Shiraz University, Shiraz

۱- استادیار گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه زابل (نویسنده مسئول)

derakhsh@gmail.com (۰۵۴۲) ۲۲۲۲۶۰۵

۲- استاد دانشکده مهندسی، بخش راه و ساختمان، دانشگاه شیراز

## ۱- مقدمه

داشتن آمار پیوسته بارندگی جهت برنامه‌ریزی در مهندسی منابع آب از ضروریات اولیه است. علاوه بر این در پیش‌بینی وضعیت آب و هوا و مسائل مربوط به آلودگی هوا، داشتن رکوردهایی منظم و طولانی از بارش لازم است.

رهیافتهای مختلفی برای مدل‌سازی بارندگی وجود دارند و در این رابطه کارهای متعددی انجام شده است که مبنای نگرش هر کدام از آنها متفاوت است. برخی از مدل‌ها بر تصادفی بودن پدیده بارندگی بر اساس تسواری بیس استوار است [۱ و ۲]. عده‌ای از محققان با نقطه‌ای دیدن پدیده بارندگی مدل‌های مجزا را برای آن ارائه می‌دهند [۳، ۴ و ۵]. برخی دیگر نیز با منطقه‌ای در نظر گرفتن این پدیده، اقدام به ارائه مدل‌های پیوسته کرده‌اند و در این راه از سیستم اطلاعات جغرافیایی نیز بهره‌جسته‌اند [۶ و ۷]. مدل‌های تصادفی که بر اساس ایده رودریگر-ایتوربه و همکاران<sup>۱</sup>، بارندگی در آنها به صورت احتمالاتی با یک شدت و زمان تداوم تصادفی در سلول‌های تصادفی طی یک فرایند پواسون وارد می‌شوند، به صورت سری‌هایی در قالب زمان خود را نشان می‌دهند و در واقع به نحوی هیتوگراف بارندگی<sup>۲</sup> را به دست می‌دهند. با استفاده از مقادیر بارندگی در ایستگاههای مجاور می‌توان الگویی مناسب را برای بارندگی‌های لحظه‌ای یک ایستگاه بارندگی درست کرده و این الگو را به نرم‌افزارهایی همچون شبکه عصبی مصنوعی ارائه داد و داده‌های مورد نیاز را از طریق این الگوی ارائه شده سنتز و کنترل نمود [۸، ۹، ۱۰].

به جز موارد مذکور می‌توان مدل‌های سری‌های زمانی را از طرق دیگر از جمله تبدیل فوریه و یا مدل سری زمانی موجک<sup>۳</sup> نیز ساخت که فرق این روش با تبدیل فوریه در این است که تبدیل فوریه در هر بار برای یک فرکانس خاص تثبیت می‌شود در حالی‌که سری از نوع موجک، می‌تواند برای فرکانس‌های متفاوت عمل نماید [۱۱].

از لحاظ بررسی مکانی، باید وابستگی مکانی نقاط مختلف واقع در یک حوزه از جمله تغییرات ارتفاع و تأثیر آن بر کمیت بارندگی در نقاط مجاور را لحاظ نمود. وابستگی بارندگی در هر نقطه از حوزه با توجه به نقاط مجاور را می‌توان از طریق خصوصیات مشابه نقاط مجاور آنها با توجه به وزن مؤثر هر نقطه در نزدیکی مکانی با نقطه مورد نظر پیش‌بینی کرد. در این رابطه ابزارهای متعددی وجود دارند که از جمله روش چند ضلعی‌های تاپسین، رگرسیون خطی و

تأثیر معکوس فاصله و یا ابزارهای مختلف زمین آماری<sup>۴</sup> شامل انواع و اقسام روشهای کریجینگ<sup>۵</sup> و یا انواع کوکریجینگ<sup>۶</sup> را می‌توان نام برد. در این میان، روشهای زمین آماری از این جهت که ضمن تخمین بارندگی، خطای تخمین به همراه واریانس خطا را نیز ارائه می‌دهند، از روشهای قوی تخمین وابستگی‌های مکانی محسوب می‌شوند. روشهایی مبتنی بر فیزیک بارندگی، تحت نام مدل‌های فیزیکی نیز ارائه شده است که بر اساس قانون مومنتم و اصل بقای جرم و انتقال انرژی عمل می‌نمایند و نیاز به داده‌های هواشناسی و اندرکنش سطوح اتمسفری دارند [۱۲]. و بالاخره برخی از مدل‌های موجود در سری‌های زمانی عبارت‌اند از: اتو رگرسیون<sup>۷</sup>، آرما<sup>۸</sup> و آریمای<sup>۹</sup> که در مورد آنها به تفصیل در کتاب مدل‌سازی کاربردی سری زمانی بحث شده است [۱۳ و ۱۴]. در این تحقیق با استفاده از کد کامپیوتری نوشته شده، ضریب شکل توابع پایه شعاعی مختلف بهینه‌سازی شده و به منظور تکمیل داده‌های ناقص تداوم بارندگی از بهترین روش بهینه‌سازی شده که کمترین خطای آماری را دارد، استفاده شد. به علاوه با این روش بهینه شده، تداوم یک نقطه درون حوزه نیز پیدا شده و با میانگین تداوم رگبار در حوزه مقایسه گردید.

## ۲- معرفی محدوده مورد مطالعه

حوزه مورد مطالعه، منطقه رودخانه پارامتا در غرب سیدنی استرالیا با مساحتی در حدود ۱۱۲ کیلو متر مربع که به بندر سیدنی می‌ریزد، بود (شکل ۱).



شکل ۱- موقعیت کلی محدوده مورد مطالعه در سیدنی استرالیا

<sup>4</sup> Geostatistical Tools

<sup>5</sup> Simple, Point, or Normal Kriging

<sup>6</sup> Normal, or Colocated Co-Kriging

<sup>7</sup> Autoregressive (AR)

<sup>8</sup> Autoregressive Moving Average (ARMA)

<sup>9</sup> Autoregressive Integrated Moving Average (ARIMA)

<sup>1</sup> Rodriguez-Irurbe et al.

<sup>2</sup> Hyetograph

<sup>3</sup> Wavelet

تعداد ۱۴ ایستگاه ثبات بارندگی در حوزه موجود بودند که هر کدام از ایستگاهها برای ۱۵ دوره مختلف (مجموعاً ۲۱۰ ایستگاه-دوره) و در هر ۵ دقیقه یک رکورد بارندگی داشتند. در واقع به ازای هر ایستگاه-دوره، بیش از ۵۷۰ رکورد بارندگی ۵ دقیقه‌ای موجود بود. در هر ایستگاه-دوره تعدادی رگبار بارندگی موجود بود که لازم بود تفکیک گردد. این تعداد ایستگاه به انضمام ۲ ایستگاه که رکوردهای آنها موجود نیست به طور متوسط هر یک سطحی به میزان ۷ کیلومتر مربع را می پوشانند که برای این ناحیه با رگبارهای از نوع همرفتی<sup>۱</sup> لازم به نظر می رسد.

### ۳- دستورالعمل تعیین رگبارهای مستقل<sup>۲</sup> از داده‌های موجود ۵ دقیقه‌ای

در بحث تعیین رگبارهای مستقل از کل داده‌ها<sup>۳</sup> کارهای متعددی انجام پذیرفتند: ابتدا برنامه کامپیوتری مختصری نوشته شد که در هر یک از ۱۴ ایستگاه تعداد رخداد بارندگی<sup>۴</sup> را مشخص می کرد. شروع هر رخداد بارندگی در ابتدای کار یک بارندگی بود که با یک حداقل عمق بارندگی ۰/۵ میلی متری در طول یک دوره کوچک ۵ دقیقه‌ای شروع می شد و ختم آن رخداد نیز زمانی بود که حداقل دو دوره ۵ دقیقه‌ای بارندگی با عمق کمتر از ۰/۵ میلی متر ثبت شده باشند. عدد ۰/۵ میلی متر کمترین میزان بارندگی بود که دستگاه باران سنج ثبات در طول دوره سالهای ۱۹۹۶ و قسمتی از سال ۱۹۹۷ برای هر ۵ دقیقه ثبت کرده است و در انتهای سال ۱۹۹۷ و سال ۱۹۹۸ این عدد به ۰/۰۱ رسیده است لذا دستورالعمل انتخاب عدد عمق بارش ۵ دقیقه‌ای مرزی<sup>۵</sup> نیز به همراه تغییر این فاصله زمانی<sup>۶</sup> در دستگاههای باران سنج ثبات با دستورالعمل موجود<sup>۷</sup> به عدد ۰/۱۵ تنزل پیدا کرد. بنابراین نقطه شروع و نقطه پایان هر رخداد بارندگی بدین ترتیب مشخص گردید. با داشتن این دو نقطه زمان بارندگی و نیز عمق بارندگی هر دوره نیز معین شدند.

ابتدا برای تعیین تعداد رخدادهای بارندگی هر ایستگاه مستقلاً بررسی گردید. مشاهده شد که در این صورت تعداد رخداد بارندگی هر ایستگاه اولاً با تعداد رخدادهای بارندگی ایستگاههای دیگر یکسان نیست به طوری که تعداد رخدادهای بارندگی ایستگاههای مختلف از ۳۵ تا ۵۳ عدد تغییر می کرد و ثانیاً رخدادهای بارندگی ایستگاههای مختلف همزمان نبودند. لذا دستورالعمل بالا در هر

زمان بارندگی برای هر ۱۴ ایستگاه به طور همزمان با هم به کار گرفته شد که در پی آن مدت زمان بارش و نیز عمق بارندگی ایستگاههای مختلف در زمانهای مختلف متفاوت از ایستگاههای جانبی خود به دست آمد که باتوجه به فاصله و تغییرات توپوگرافی بین ایستگاهها، این تغییر امری کاملاً طبیعی بود. با این دستورالعمل تعداد ۴۵ رخداد از مجموعه داده‌های ۵ دقیقه‌ای مطابق جدول ۱ استخراج گردید که با توجه به شرایط این رخدادها و با توجه به اینکه طول دوره برخی از رخدادها بسیار کم بود (در حد ۲۰ دقیقه) در نهایت ۶ رخداد کنار گذاشته شد و مجموعاً ۳۹ رخداد مستقل تشخیص داده و مورد قبول واقع شد و مبنای کارهای بعدی قرار گرفت. برنامه‌های مشابهی نیز نوشته شدند که مجموع بارندگی روزانه و یا ساعتی را از روی داده‌های بارندگی ۵ دقیقه‌ای مشخص می کردند.

جدول ۱ توضیحات کلی راجع به رگبارهای مختلف در زمانهای وقوع آنها بین سالهای ۱۹۹۶ تا ۱۹۹۸ را شرح می دهد. با توجه به تحقیقاتی که به عمل آمد مشخص گردید دیدگاه تعیین دستورالعمل زمان شروع و ختم رخدادهای بارندگی در مکانها و محققان مختلف دنیا ثابت نبوده و افراد مختلف با آن با توجه به داده‌های بارندگی و زمان بارش به صورت موضوعی<sup>۸</sup> برخورد می کنند. از جمله کارهای انجام شده در این زمینه، تحقیقات هنکر و همکاران<sup>۹</sup> را می توان نام برد که فاصله زمانی بدون بارندگی بین دو رخداد مستقل را یک ساعت در نظر می گیرد ولی دیگر مؤلفین این زمان را ۳ ساعت برای بارندگی‌های سبک تا متوسط و ۶ ساعت برای بارندگی‌های سنگین در نظر گرفته‌اند [۱۵]. هرشنهورن<sup>۱۰</sup> و والهیسر<sup>۱۱</sup> در سال ۱۹۸۷ نیز دستورالعملی برای تعیین رخدادهای بارندگی مستقل ارائه دادند که طی آن در هر دوره‌ای که حداقل عمق بارندگی ۰/۲۵۴ میلی متر بوده و زمانهای بیش از ده دقیقه‌ای با عمق صفر (بدون بارندگی) در آن وجود نداشته باشد یک رخداد مستقل بارندگی محسوب می شود و این زمانهای بیش از ده دقیقه بدون بارندگی (با عمق صفر) به عنوان ناحیه جدا کننده رخدادها در نظر گرفته می شوند [۱۶]. هوانگ و همکاران<sup>۱۲</sup> در سال ۱۹۹۹ برای تعیین رخدادهای بارندگی روشی را ارائه دادند که کل رخداد را به دو بخش عمده رخداد کامل و مرکز ثقل رخداد تقسیم می کند به طوری که با حذف کردن زمانهای انتهایی از دو طرف رخداد کامل، مرکز ثقل آن مشخص می شود و این رخدادها بعداً در طراحی

<sup>8</sup> Subjective

<sup>9</sup> Heneker et al.

<sup>10</sup> Hershenthorn

<sup>11</sup> Woolhiser

<sup>12</sup> Hoang et al.

<sup>1</sup> Convective

<sup>2</sup> Event Definition

<sup>3</sup> Database

<sup>4</sup> Event

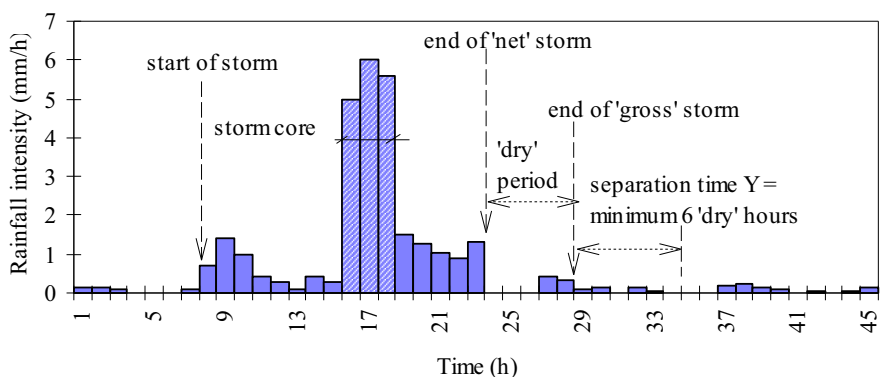
<sup>5</sup> Threshold

<sup>6</sup> Resolution

<sup>7</sup> Criteria

جدول ۱- پراکنندگی زمان وقوع رگبارهای مختلف بین سالهای ۱۹۹۶ تا ۱۹۹۸

تعداد رگبار	تعداد روز رگبار	روز های رگبار	زمان شروع رگبار
۶	۶	۲ تا ۷ ژانویه	۲ ژانویه ۱۹۹۶
۳	۲	۱۱ تا ۱۲ آوریل	۱۱ آوریل ۱۹۹۶
۳	۵	۲ تا ۶ می	۲ می ۱۹۹۶
۲	۲	۲۷ تا ۲۸ ژولای	۲۷ ژولای ۱۹۹۶
۱	۲	۳۰ تا ۳۱ اوت	۳۰ اوت ۱۹۹۶
تعداد کل رگبار در سال ۱۹۹۶ = ۱۵      تعداد کل روز در سال ۱۹۹۶ = ۱۷ روز			
۳	۳	۲۹ تا ۳۱ ژانویه	۲۹ ژانویه ۱۹۹۷
۱	۱	۷ تا ۷ اکتبر	۷ اکتبر ۱۹۹۷
تعداد کل رگبار در سال ۱۹۹۷ = ۴      تعداد کل روز در سال ۱۹۹۷ = ۴ روز			
۲	۲	۲۴ تا ۲۵ ژانویه	۲۴ ژانویه ۱۹۹۸
۲	۲	۹ تا ۱۰ آوریل	۹ آوریل ۱۹۹۸
۲	۳	۲۱ تا ۲۳ آوریل	۲۱ آوریل ۱۹۹۸
۳	۵	۲ تا ۶ می	۲ می ۱۹۹۸
۲	۳	۱۷ تا ۱۹ می	۱۷ می ۱۹۹۸
۲	۲	۲۲ تا ۲۳ ژوئن	۲۲ ژوئن ۱۹۹۸
۹	۴	۵ تا ۸ اوت	۵ اوت ۱۹۹۸
۴	۴	۱۵ تا ۱۸ اوت	۱۵ اوت ۱۹۹۸
تعداد کل رگبار در سال ۱۹۹۸ = ۲۶      تعداد کل روز در سال ۱۹۹۸ = ۲۵ روز			
تعداد کل رگبار در طی ۳ سال = ۴۵      تعداد کل روز در طی ۳ سال = ۴۶ روز			



شکل ۲- دستورالعمل تعیین رخداد های بارندگی به روش هوانگ و همکاران [۱۷]

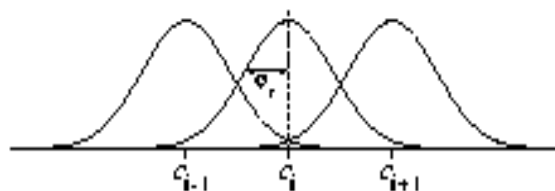
باشد و بارندگی ساعتی در دوره خشک باید کمتر از ۱/۲ میلی متر بوده و متوسط شدت بارندگی در طول دوره خشک نیز کمتر از ۰/۲۵۵ میلی متر بر ساعت باشد.

سیلاب ناشی از آبهای سطحی مورد استفاده قرار می گیرند [۱۷]. طبق مدل مذکور که در شکل ۲ آمده، نقطه شروع و پایان بارندگی باید همراه با بارندگی با شدتی بیش از ۰/۲۵۵ میلی متر بر ساعت باشد که قبل و بعد از آن هم یک زمان خشک ۶ ساعته وجود داشته

#### ۴- روشهای مکانی نگاشت داده‌ها در پایگاه داده و تکمیل داده‌های ناقص

در روش درونیابی توابع پایه شعاعی مطابق شکل ۳ ایستگاههای مختلف با ایستگاه مورد نظر به طور کلی توسط مختصات مکانی مرتبط هستند. به این صورت که بین هر یک از ایستگاههای با اطلاعات معلوم و ایستگاهی که باید اطلاعات آن را به دست آورد، این ارتباط فاصله‌ای که نسبت به نقاط مختلف رویه‌های کلاه مانند تغییر می‌نماید، برقرار باشد.

با روشهای چندضلعی تاینسن<sup>۱</sup>، روش ایزوهیتال<sup>۲</sup>، روش معکوس وزنی فاصله<sup>۳</sup>، روش درونیابی مبتنی بر توابع پایه شعاعی می‌توان خلاء مربوط به اطلاعات و داده‌ها را پر نمود [۱۸].



شکل ۳- نمایش توابع پایه شعاعی

در واقع سهم هریک از ایستگاههای جانبی در تشخیص مقدار مورد نظر برای یک ایستگاه، تابعی از مختصات مکانی بین تک تک این ایستگاههای جانبی و ایستگاه مورد نظر است که این توابع به پنج نوع مختلف زیر تقسیم می‌شوند [۱۹]:  
۱- روش مالتی کوادریک<sup>۴</sup> که از مرکز مطابق شکل ۳ افزایش می‌یابد و به صورت رابطه زیر است

$$\phi(r) = (r^2 + c^2)^{1/2} \quad (2)$$

که در آن

$\phi(r)$  تابع پایه شعاعی،  $r$  فاصله اقلیدسی بین نقطه مورد نظر و هر یک از نقاط موجود و ضریب  $C$  ضریب تاثیر شکل تابع است.

۲- روش معکوس مالتی کوادریک<sup>۵</sup> که از مرکز مطابق شکل ۳ به صورت یکنوا کاهش می‌یابد و به صورت رابطه زیر است

$$\phi(r) = (r^2 + c^2)^{-1/2} \quad (3)$$

۳- روش گوسی<sup>۶</sup> که از مرکز مطابق شکل ۳ به صورت یکنوا کاهش می‌یابد و به شکل زیر است

$$\phi(r) = \exp(-r^2 / c^2) \quad (4)$$

۴- روش کوشی<sup>۷</sup>

$$\phi(r) = (r^2 + c^2)^{-1} \quad (5)$$

۵- روش نوار صفحات نازک<sup>۸</sup>

$$\phi(r) = (cr)^2 \ln(cr) \quad (6)$$

#### ۵- روش کار

از روشهای پنجانگانه تابع شعاعی بالا، روش اول انتخاب شد و یک مقدار مشخص  $C$  برای آن در نظر گرفته شد و با این ضریب تاثیر شکل خاص، تفاوت میزان به دست آمده برای کمیته از طریق اعتبارسنجی جانبی و میزان مشاهده شده آن محاسبه گردید و به این ترتیب مختصات یک نقطه به دست آمد. سپس با افزایش سیستماتیک مقدار  $C$  به اندازه  $\Delta C$ ، نقاط دیگری به دست آمدند که نهایتاً منجر به رسم شکل ۴- الف شد. به عنوان مثال هر گاه در یک رگبار خاص (رگبار شماره ۱) در یک ایستگاه خاص  $X_0$ ، درونیابی مقدار زمان بارندگی  $\hat{D}(X_0)$  از طریق مقدار سایر ایستگاهها مورد نظر باشد

$$\hat{D}(X_0) = \sum_{i=1}^n c_i \phi(\|X_i - X_0\|) \quad (7)$$

که در آن

$c_i$  ضریب وزنی است که مربوط به داده مشاهده شده  $X_i$  است و  $\phi(\|X_i - X_0\|)$  یک تابع مناسب فاصله بین  $X_i$  و  $X_0$  است. برای تشخیص  $c_i$  باید از روش اعتبارسنجی جانبی استفاده کرد. به این ترتیب که با حذف موقت هر یک از ۱۴ ایستگاه، رابطه بالا برای هر یک از ایستگاهها نوشته شده و مقدار مورد نظر آن ایستگاه  $(D(x_s))$  که یک مقدار مشاهده شده هم برای آن موجود است، از طریق ۱۳ ایستگاه دیگر پیدا می‌شود و مقدار محاسبه شده با مقدار مشاهده شده مقایسه می‌گردد.

$$D(x_s) = \sum_{i=1}^{14} c_i \phi(\|X_i - X_s\|) \quad \forall s = 1, 2, 3, \dots, 14 \quad (8)$$

سپس همین کار برای یک مقدار ضریب تاثیر شکل جدید انجام می‌شود. با داشتن مقادیر مختلف ضریب تاثیر شکل به عنوان محور افقی و تفاوتهای مقادیر مشاهده‌ای و محاسبه شده از کمیته مورد نظر و رسم نقاط مختلف می‌توان به  $C$  بهینه یعنی ضریب تاثیر شکلی که کمترین میزان نرمالیزه شده جذر مربع اختلاف بین مشاهده و محاسبه را داراست، دست پیدا کرد. با این ضریب شکل بهینه به دست آمده تداوم بارندگی هر ایستگاه برای رگبار خاص

<sup>7</sup> Cauchy RBF Function

<sup>8</sup> Thin-Plate Spline RBF Function

<sup>1</sup>Theissen Polygons

<sup>2</sup> Isohyetal method

<sup>3</sup> Inverse Weighting Distance

<sup>4</sup> Multiquadric RBF Function

<sup>5</sup> Inverse Multiquadric RBF Function

<sup>6</sup>Gaussian RBF Function

(شماره ۱) پیدا می‌شود. مقادیر به دست آمده در شکل ۴-ب با مقادیر مشاهده‌ای مقایسه شده‌اند. حال با تعویض روش می‌توان ضریب تأثیر شکل را برای هر یک از چهار روش دیگر نیز به دست آورد. تا این مرحله برای هر روش مقادیر  $C_{opt}$ ,  $NMSE$ ,  $PAEE$  و  $R^2$  محاسبه شده‌اند و هر روشی که بیشترین ضریب  $R^2$  و کمترین میزان خطا را به دست بدهد به عنوان بهترین روش برای درونیابی شناخته می‌شود. بدیهی است با تشخیص آن ضریب شکل باید کل محاسبات درونیابی واقعی را بر اساس همین ضریب شکل ثابت و براساس رابطه ۸ انجام داد.

$$PAEE = \frac{100\%}{\bar{D}n} \sum_{k=1}^n [\hat{D}(X_k) - D(X_k)] \quad (9)$$

این میزان باید در حد صفر باشد که در آن  $\hat{D}(X_k)$  مقدار بارندگی محاسبه شده در نقطه  $X_k$  و  $D(X_k)$  زمان بارندگی مشاهده شده در نقطه مورد سوال  $X_k$  و  $n$  تعداد ایستگاههای موجود و  $\bar{D}$  متوسط زمان بارش است.

$$NMSE = \frac{1}{s^2 n} \sum_{k=1}^n [\hat{D}(X_k) - D(X_k)]^2 \quad (10)$$

این میزان باید در حد صفر باشد که در آن  $S^2$  واریانس داده‌های مشاهده شده و نهایتاً از دیگر ابزار کنترل آماری،  $R^2$  مربع ضریب همبستگی بین داده‌های مشاهده‌ای و داده‌های محاسبه شده است. این مقایسه نسبت به خط ۴۵ درجه که از قبل رسم شده است، صورت می‌پذیرد. بدیهی است این مقدار باید هر چه بیشتر به عدد یک نزدیک‌تر باشد.

## ۶- نتایج و بحث

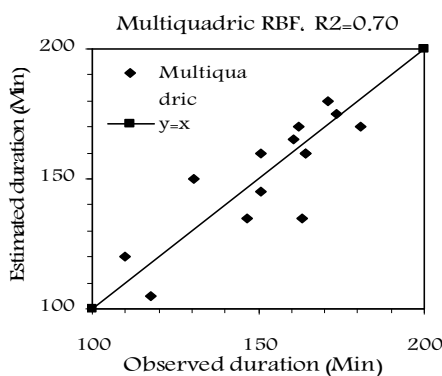
با توجه به مطالب بالا برای رگبار اول که اطلاعات آن در

جدول ۲ آمده است، روش یاد شده به کار گرفته شد. مقادیر محاسبه شده تداوم بر اساس مقدار بهینه ضریب شکل را بر حسب مقادیر مشاهده شده آنها نشان می‌دهد (جدول ۳). براساس ضریب شکل، بهینه تداوم یک نقطه در داخل محدوده برای هر روش محاسبه شده است که این مقدار را نیز می‌توان براساس مقایسه مختصات نقطه نمونه و نقاط موجود با مقدار واقعی به طور تقریبی مقایسه نمود.

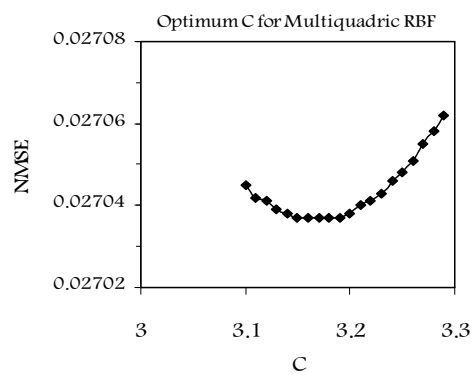
همانگونه که در جدول ۳ دیده می‌شود، بهترین روش درونیابی برای این رگبار روش تابع شعاعی پایه مالتی کوادریک است که به کمترین خطای آماری و بیشترین  $R^2$  منجر شده است. به عنوان نمونه، نقطه‌ای در داخل دامنه حوزه با این روش درونیابی شد که نتایج درونیابی با متوسط حوزه همخوانی داشت. مقدار  $NMSE$  در یک حالت ایده‌آل باید صفر باشد و هر چه جواب به دست آمده به صفر نزدیک‌تر باشد نشان از دقت روش تخمین دارد. از روشهای کنترل آماری دیگر محاسبه درصد متوسط خطای تخمین  $PAEE$  است که آن هم باید صفر باشد و یا مربع ضریب همبستگی  $R^2$  که میزان درجه همبستگی بین مقدار محاسبه شده با مقدار مشاهده شده را نشان می‌دهد و این مقایسه نسبت به خط ۴۵ درجه که از قبل رسم شده است، صورت می‌پذیرد. بدیهی است این مقدار باید هر چه بیشتر به عدد یک نزدیک باشد.

در اینجا برای انتخاب  $C_{opt}$ ، هر سه  $NMSE$ ،  $PAE$  و  $R^2$  ملاک انتخاب قرار گرفتند و دیده شد که در روش مالتی کوادریک هر سه این کمیتهای آماری بهتر از بقیه روشها به دست آمده‌اند، به همین دلیل از این روش برای تکمیل داده‌های ناقص تداوم بارندگی استفاده گردید.

هرچند در این تحقیق بدترین نتیجه مربوط به تابع گوسی بود ولی این نتایج را نمی‌توان به مکان‌های دیگر تعمیم داد و مخصوص همین حوزه است.



(ب)



(الف)

شکل ۴- الف) دیگرام  $C-NMSE$  برای بهینه سازی  $C$  به روش درونیابی تابع شعاعی پایه مالتی کوادریک و ب) نمودار پراکندگی طول دوره رگبار محاسبه شده بر حسب مشاهده شده به روش بالا

جدول ۲- زمان مشاهده‌ای و سایر آمار برای رگبار شماره ۱ و برای ۱۴ ایستگاه

ایستگاه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴
تداوم رگبار	۱۰۵	۱۵۰	۱۲۰	۱۳۵	۱۴۵	۱۸۰	۱۷۰	۱۷۵	۱۳۵	۱۶۰	۱۶۵	۱۷۰	۱۶۰	۱۶۰

نتایج آماری تداوم رگبارها: حداقل: ۱۰۵ و حداکثر: ۱۸۰ و میانگین: ۱۵۲/۱۴ و انحراف از معیار: ۲۱/۸۱۳ (دقیقه)

جدول ۳- خلاصه آمار اعتبارسنجی جانبی برای پنج روش درونیابی توابع پایه شعاعی

مدل RBF	ضریب شکل بهینه $C_{opt}$	NMSE	PAEE	$R^2$	D(۳۰۰ و ۶۲۶۲) (دقیقه)
مالتی کوادریک	۳/۱۷	۰/۰۲	۰/۷۷	۰/۷۰	۱۵۰/۵۳
مالتی کوادریک معکوس	۵/۷۱	۰/۰۴	-۲/۹۴	۰/۵۷	۱۵۰/۶۵
گوسی	۶/۳۷	۰/۰۸	-۹/۴۸	۰/۴۸	۱۵۲/۸۸
کوشی	۷/۷۲	-۰/۰۵	-۴/۳۶	۰/۵۶	۱۵۱/۱۴
نوار صفحات نازک	۰/۰۴	۰/۰۳	۲/۱۶	۰/۵۳	۱۴۹/۹۷

قابلیت کد انجام این کار را میسر می‌سازد). به تدقیق چشمی نقطه بهینه پرداخته شد.

#### ۷- نتیجه‌گیری

برای تکمیل داده‌های ناقص تداوم بارندگی یا تکمیل آمار تداوم بارندگی از بین روشهای توابع شعاعی برای مجموعه داده‌های موجود، روش مالتی کوادریک بهتر از بقیه روشها عمل می‌نماید، بنابراین استفاده از این روش توصیه می‌شود.

برای مقادیر ضریب شکل، مقادیر محدودی را باید در نظر گرفت زیرا مقادیر آن در دامنه بزرگی عمل نمی‌نماید و نیز برای بهتر دیده شدن نتایج بهینه کردن مقادیر ضریب شکل و تأثیر آن و بهتر پیدا کردن نقطه بهینه، باید محدوده مقادیر آنرا مرتباً کوچک و کوچک تر نمود. در واقع محدوده C از این روش به دست آمده است یعنی ابتدا محدوده بزرگ تری برای آن انتخاب شد و مشاهده گردید که نقطه بهینه به خوبی از نظر چشمی (و نه محاسباتی) دیده نمی‌شود و لذا با کاستن محدوده C و همین‌طور احیاناً مقادیر  $\Delta C$  (که

#### ۸- مراجع

- 1- Todini, E. (2001). "A bayesian technique for conditioning radar precipitation estimates to rain-gauge measurements." *Hydrology and Earth System Sciences*, 5(2), 187-199.
- 2- Mackay, N. G., Chandler, R. E., Onof, C., and Wheater, H. S. (2001). "Disaggregation of spatial rainfall fields for hydrological modeling." *Hydrology and Earth System Sciences*, 5(2), 165-173.
- 3- Rodriguez-Iturbe, I., Cox, D. R., and Isham, V. (1987). "Some models for rainfall based on stochastic point processes." *Mathematical and Physical Sciences*, 410, 269-288.
- 4- Glasbey, C. A., Cooper, G., and Mcgechan, M. B. (1995). "Disaggregation of daily rainfall by conditional simulation from a point-process model." *J. of Hydrology*, 165, 1-9.
- 5- Bo, Z., Islam, S., and Eltahir, E. A. B. (1994). "Aggregation-disaggregation properties of a stochastic rainfall model." *Water Resources Research*, 30(12), 3423-3435.
- 6- Ormsbee, L. E. (1989). "Rainfall disaggregation model for continuous hydrologic modeling." *J. of Hydraulic Engineering*, 115(4), 507-525.
- 7- Cowpertwait, P. S. P. (2001). "A continuous stochastic disaggregation model of rainfall for peak flow simulation in urban hydrologic systems." *Mathematical Reseach Letters*, 2, 81-88.
- 8- Shams, S., Abedini M. J., and Asghari K. (2003). "Rainfall disaggregation via artificial neural networks." 4<sup>th</sup> *Iranian Hydraulic Conference*, Shiraz University, Shiraz, 1-8.

- 9- Burian, S. J., Durrans, S. R., Nix, S. J., and Pitt, R. E. (2001). "Training artificial neural networks to perform rainfall disaggregation." *J. of Hydrologic Engineering*, 6(1), 43-51.
- 10- Burian, S. J., Durrans, S. R., Tomic, S., Pimmel, R. L., and Wai, C.N. (2000). "Rainfall disaggregation using artificial neural networks." *J. of Hydrologic Engineering*, 5(3), 299-307.
- 11- Tantane, S., Patamatunkul, S., Oki, Sriboonlue, V., and Prempre, T. (2005). "Downscaled rainfall prediction model (DRPM) using a unit disaggregation curve (UDC)." *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 2, 543-568.
- 12- Fox, N. I., and Collier, C. G. (2000). "Physical disaggregation of numerical model rainfall." *Hydrology and Earth System Sciences*, 4(3), 419-424.
- 13- Salas, J. D., Delleur, J. W., Yevjevich, V., and Lane, W. (1988). *Applied modeling of hydrologic time series*, Water Resources Pub., USA.
- 14- Luk, K. C., Ball, J. E., and Sharma, A. (2000). "A study of optimal model lag and spatial inputs to artificial neural network for rainfall forecasting." *J. of Hydrology*, 227(1), 56-66.
- 15- Heneker, T. M., Lambert, F., and Kuczera, G. (2001). "A point rainfall model for risk-based design." *J. of Hydrology*, 247(1), 54-71.
- 16- Hershenhorn, J., and Woolhiser, D. A. (1987). "Disaggregation of daily rainfall." *J. of Hydrology*, 95, 299-322.
- 17- Hoang, T. M. T., Rahman, A., Weinmann, P. E., Laurenson, E. M., and Nathan, R. J. (1999). "Joint probability description of design rainfalls." *Proc. of Water 99 Joint Congress – Brisbane*, Australia, Institute of Engineers, 379-384.
- 18- Magness, A. L. G., and McCuen, R. H. (2004). "Accuracy evaluation of rainfall disaggregation methods." *J. of Hydrologic Engineering*, 9(2), 71-77.
- 19- Rippa, S. (1999). "An algorithm for selecting a good value for the parameter C in radial basis function interpolation." *Advances in Computational Mathematics*, 11, 193-210.