

EXTENDED ABSTRACT

Comparing Different Processes for Mapping Reference Evapotranspiration in Iran

E. Naderianfar¹, M. Delbari^{2*}, P. Afrasiab³ and P. Kahkhamoghaddam⁴

- 1- M.Sc. in Irrigation and Drainage, Department of Water Engineering, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Iran.
- 2*- Corresponding Author, Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Iran (*masoomeh.delbari@uoz.ac.ir*).
- 3- Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Iran.
- 4- Faculty member, Department of Water Engineering, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Iran.

Received: 7 December 2016

Revised: 22 November 2017

Accepted: 26 November 2017

Keywords: Evapotranspiration, Penman-Monteith, Spatial variation, Interpolation, Kriging.

DOI: 10.22055/jise.2017.20116.1439.

Introduction

Estimation of reference evapotranspiration (ET_0) is essential to determine water requirements of crops. In other words, to regionalize ET_0 to a large area, some interpolation methods should be used (Goovaerts, 1997). A key parameter which may influence the proper performance of interpolation methods, is the sequence of ET_0 estimation process (Mardikis et al., 2005; Vilanova et al., 2012). That is why using some auxiliary variables cross correlated with the main variable, could significantly improve the accuracy of interpolation methods. Therefore, this study aims to analyze the estimation process sequences while investigating spatial variability of annual and monthly ET_0 in Iran. A comprehensive comparison of spatial interpolators is performed. Elevation is also used as a secondary variable in multivariate methods.

Methodology

This study presents a comparison of two different processes namely "interpolate first, calculate later (IC)" and "calculate first, interpolate later (CI)" for estimating and mapping annual and monthly ET_0 in Iran. In the first process, all the meteorological parameters required to calculate ET_0 were interpolated and then ET_0 was calculated on the interpolation network defined over the study area using the FAO - Penman-Monteith equation. In the second approach which is more common, ET_0 was first calculated for the selected stations given the required meteorological parameters and then interpolated over the study area. The interpolation methods used were ordinary kriging (OK) with and without an auxiliary variable, radial basis functions (RBF), local polynomial (LPI) and inverse distance weighting (IDW).

The weather data used to estimate and calculate ET_0 belonged to 116 synoptic stations scattered all over the country.

In this study, one third of data was kept aside at the beginning for evaluation purposes and the methodology was performed on the rest of data. Several comparison criteria were used for assessing the results including RMSE, MBE and MAE.

Findings

The autocorrelation analysis was performed for weather data including Max Temperature, Min Temperature, Mean Temperature, Wind Speed, Relative Humidity and Solar radiation, as well as calculated ET_0 . None of the variables showed a significant anisotropy; so, it was assumed that all variables are isotropic. The results showed that ET_0 has a moderate to strong spatial correlation with a spherical structure. Overall, ignoring the interpolation method used, IC performed better than CI for the majority of months and on an annual scale. However, this result differs from Mardikis et al. (2005) and Bechini et al. (2000) who reported that CI is superior to IC. The best interpolation method (according to RMSE and MAE) in IC procedure was IDW for September, October and the annual case, OK for January and March and COK for February, April, November and December. IDW with CI procedure was the best method for estimating ET_0 for May, June, July and August. Overall, the comparison of interpolation methods indicated that for both IC and CI, OK, COK and IDW, which incorporate the separation distance in estimation procedure, performed better than the other approaches. The highest reference ET_0 occurs in southern, southwestern and eastern parts of the study area, while central parts have lower ET_0 and north and northwestern regions have the lowest ET_0 values.

Conclusion

In this study, both spatial correlation and interpolation of ET_0 , important weather parameters in the Penman-Monteith equation as well as the sequence of spatial interpolation of ET_0 were investigated. Statistical analysis showed that the highest coefficient of variation (CV) is seen for cold months and the lowest CV is seen for warm months. It was found that it is impossible to find a single appropriate technique for all months and seasons. Assessment of different interpolation methods showed that the very fast and simple IDW method is good enough when the aim is to find an overall view of spatial distribution of ET_0 , especially when the sampling locations are sparse. Moreover, the results confirmed that using an appropriate secondary variable could improve the results of spatial interpolation. In summary, IC performed better than CI for estimating monthly and annual ET_0 except for June, July and August.

Acknowledgement

The authors of the article thank the Meteorological Organization for providing the raw data of the article.

References

- 1- Bechini, L., Ducco, G., Donatelli, M. and A. Stein. 2000. Modelling, interpolation and stochastic simulation in space and time of global solar radiation. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 81: 29–42.
- 2- Goovaerts, P. 1997. *Geostatistics for natural resources evaluation*. Oxford University Press, New York.
- 3- Mardikis, M. G., Kalivas, D. P., and Kollias, V. J. 2005. Comparison of Interpolation Methods for the Prediction of Reference Evapotranspiration—An Application in Greece. *Water Resources Management*, 19: 251–278.
- 4- Vilanova, M. R. N., Simoes, Silvio. J. C. and Trannin, Isabel, C. B. 2012. Geospatial interpolation of reference evapotranspiration (ET_0) in areas with scarce data: case study in the South of Minas Gerais, Brazil, *Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, 7 (2): 179-194.





مقایسه فرایندهای مختلف پهنه‌بندی تبخیر تعرق مرجع در ایران

الهام نادریان فرا^۱، معصومه دلبری^{۲*}، پیمان افراسیاب^۳ و پریسا کهخامقدم^۴

- ۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل
 ۲- نویسنده مسئول: دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل masoomeh.delbari@uoz.ac.ir
 ۳- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل.
 ۴- عضو هیئت علمی گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل.

پذیرش: ۱۳۹۶/۹/۵

بازنگری: ۱۳۹۶/۹/۱

دریافت: ۱۳۹۵/۹/۱۷

چکیده

یکی از فاکتورهای موثر بر عملکرد روش‌های میان‌یابی تبخیر تعرق مرجع (ET_0)، ترتیب مراحل تخمین ET_0 است. در این پژوهش ضمن بررسی تغییرات مکانی تبخیر تعرق ماهانه و سالانه، دو فرایند مختلف با عنوان میان‌یابی، سپس محاسبه (IC) و محاسبه، سپس میان‌یابی (CI) برای برآورد پهنه‌بندی تبخیر تعرق مرجع ماهانه و سالانه در ایران، مقایسه شدند. در روش اول، ابتدا پارامترهای هواشناسی مورد نیاز رابطه استاندارد تبخیر تعرق، میان‌یابی شده، سپس مقادیر ET_0 در نقاط شبکه با استفاده از رابطه فائو پنمن-مانتیت محاسبه شد. در روش دوم، ابتدا ET_0 در ایستگاه‌های منتخب محاسبه و سپس در گستره ایران میان‌یابی شد. برای میان‌یابی از روش‌های کریجینگ معمولی (OK) با و بدون متغیر کمکی، توابع پایه شعاعی (RBF)، چندجمله‌ای محلی (LPI) و وزن‌دهی عکس فاصله (IDW) استفاده شد. براساس نتایج تحلیل نیم‌تغییرنما، ET_0 دارای همبستگی مکانی متوسط تا قوی با ساختار مکانی کروی است. به‌طور کلی صرف‌نظر از نوع روش میان‌یابی، در بیشتر ماه‌ها و در مقیاس سالانه، فرآیند IC دارای عملکرد بهتری بود. بهترین روش میان‌یابی در فرایند IC براساس RMSE و MAE برای ماه‌های سپتامبر، اکتبر و سالانه، روش IDW، برای ماه‌های ژانویه و مارس، روش OK و برای ماه‌های فوریه، آوریل، نوامبر و دسامبر، روش COK بود. روش IDW و فرآیند CI با اختلاف کمی نسبت به فرآیند IC، بهترین عملکرد را در تخمین ET_0 ماه‌های مه، ژوئن، جولای و آگوست دارا بود. همچنین در هر دو فرایند IC و CI، روش‌های OK، COK و IDW که فاصله بین ایستگاه‌ها را در فرایند تخمین لحاظ می‌کنند، عملکرد بهتری داشتند.

کلیدواژه‌ها: پنمن مانیتیت، تبخیر تعرق، تغییرات مکانی، کریجینگ، میان‌یابی.

مقدمه

(et al., 2010). بنابراین از آنجا که بخش کشاورزی مصرف‌کننده اصلی آب در کشور است، با بهبود مدیریت مصرف آب در این بخش و افزایش بهره‌وری مصرف آن می‌توان به نحو قابل توجهی در مصرف آب صرفه‌جویی کرد. یکی از مهمترین روش‌های بهبود مدیریت مصرف آب در مزرعه، تخمین صحیح میزان آب مصرفی گیاه یا تبخیر تعرق است. روش‌های مختلفی از جمله روش‌های تجربی، تئوری و ترکیبی برای محاسبه تبخیر تعرق مرجع ارائه شده است که دقت آن‌ها بسته به خصوصیات اقلیمی منطقه و مقیاس زمانی و مکانی مورد مطالعه متفاوت است. مطالعه‌های بسیاری در رابطه با ارزیابی روش‌های محاسبه ET_0 در شرایط مختلف اقلیمی انجام شده است. در این میان روش ترکیبی فائو پنمن-مانتیت به‌عنوان یک روش استاندارد و دقیق برای تخمین ET_0 برای محدوده وسیعی از شرایط اقلیمی و

تبخیر تعرق مرجع (ET_0) یکی از مهم‌ترین اجزای چرخه هیدرولوژیکی می‌باشد و تخمین دقیق آن برای بسیاری از مطالعات نظیر بیلان هیدرولوژیکی آب، طراحی و مدیریت سیستم‌های آبیاری، شبیه‌سازی مراحل رشد و عملکرد گیاهی و برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب ضروری است. از طرفی در سال‌های اخیر مدیریت منابع آب براساس توسعه پایدار مورد توجه محققین زیادی قرار گرفته است (Rezaei and Zolfaghari, 2014). کشور ایران از لحاظ اقلیمی و شرایط آب و هوایی جزء کشورهای خشک و نیمه‌خشک به حساب می‌آید و در حال حاضر حدود ۹۳ درصد آب استحصالی از منابع آب کشور به بخش کشاورزی، ۶ درصد به بخش خانگی و مابقی به بخش صنعت و نیازهای متفرقه دیگر اختصاص دارد (Ansari

می‌رسد مقدار خطای کل در صورتی که ابتدا مقدار ET_0 برای هر ایستگاه محاسبه شود و سپس مقادیر نقطه‌ای برای کل منطقه میان‌یابی شوند با زمانی که اول پارامترهای هواشناسی مورد نیاز محاسبه ET_0 در شبکه‌ای از نقاط میان‌یابی شوند و سپس مقادیر ET_0 در همان نقاط محاسبه شوند، متفاوت باشد (Mardikis et al., 2005). چندی از محققین عملکرد این دو شیوه یعنی ابتدا محاسبه سپس درون‌یابی (CI) و یا ابتدا میان‌یابی سپس محاسبه (IC) را برای تخمین ET_0 با یکدیگر مقایسه کرده‌اند.

Mardikis et al. (2005) در یونان چ‌پهار روش OK، IDW، RK و IDW با اضافه کردن متغیر کمکی ارتفاع را برای پیش‌بینی توزیع مکانی ET_0 روزانه (محاسبه شده با روش فائو پنمن - مانتیث) مورد ارزیابی قرار دادند. آن‌ها از دو روش متفاوت CI و IC برای برآورد ET_0 استفاده کردند. نتایج نشان داد که روش‌های CI و IC هیچ تأثیری بر روی عملکرد چ‌پهار روش درون‌یابی مورد مطالعه نداشتند و در مقابل اضافه نمودن پارامتر کمکی ارتفاع به‌طور قابل توجهی باعث بهبود عملکرد روش‌های درون‌یابی چندمتغیره شد. Vilanova et al. (2012) درون‌یابی مکانی ET_0 در مناطق دارای کمبود داده در جنوب میناس برزیل را با استفاده از روش CI انجام دادند. نتایج نشان داد روش کریجینگ مکانی حتی با استفاده از چند ایستگاه، درون‌یابی رضایت بخشی از ET_0 به‌دست می‌دهد. در تحقیقات Smith (2014) بر روی روش‌های تخمین ET_0 ، RK با مدل‌های مختلف کوواریانس مورد بررسی قرار گرفت و یک مدل کوواریانس غیرخطی به‌عنوان بهترین معرف تغییرات مکانی یافت شد. روش IDW با روش کریجینگ مقایسه و به‌عنوان روش برتر در طول فصل زمستان انتخاب شد. روش‌های IC و CI با یکدیگر مقایسه شدند و مشخص شد روش IC در طول تابستان خطای برآورد کمتری دارد. در مجموع با توجه به اهمیت تخمین صحیح ET_0 در بسیاری از مطالعات نظیر بیلان هیدرولوژیکی آب، طراحی و مدیریت سیستم‌های آبیاری، شبیه‌سازی تولید گیاهی، برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب و تأثیر روش‌ها و فرایندهای مختلف برآورد در دقت مقادیر برآورد شده ET_0 ، این پژوهش به‌منظور نیل به اهداف زیر انجام شد:

(۱) بررسی همبستگی مکانی ET_0 (۲) مقایسه دو فرایند متفاوت IC و CI و (۳) مقایسه روش‌های میان‌یابی OK، COK، IDW، LPI و توابع پایه شعاعی (RBF) برای تخمین ET_0 در مقیاس ماهانه و سالانه در سطح کشور.

مواد و روش‌ها

محدوده مطالعاتی

ایران با مساحت ۱۶۴۸۱۹۵ کیلومتر مربع در محدوده ۲۵ تا ۴۰ درجه عرض شمالی و ۴۴ تا ۶۳ درجه طول شرقی واقع شده است و جزو مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان محسوب می‌شود و اختلاف دما در زمستان بین گرم‌ترین و سردترین نقطه کشورگاهی

منطقه‌ای شناخته شده است (Zare Abyaneh et al., 2010). Zhao et al., 2010; Majidi and Alizadeh, 2011). در پژوهشی روش‌های مختلف برآورد ET_0 در ایران را مورد ارزیابی قرار دادند. در این تحقیق ET_0 با کمک نرم افزار REF-ET به ۱۳ روش مختلف محاسبه و نتایج آن با داده‌های لایسیمتری مقایسه شد. نتایج نشان داد روش‌های با پایه پنمن در اکثر مناطق ایران مناسب‌ترین روش‌ها برای برآورد ET_0 به‌شمار می‌آیند. Dehghan و Alizadeh (2012) روش‌های مختلف برآورد ET_0 را در شرایط محدودیت داده‌های اقلیمی مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد وقتی که داده‌های تابش خالص و سرعت باد در دسترس باشند روش فائوپنمن - مانتیث گزینه خوبی برای برآورد تبخیرتعرق در استان خراسان رضوی می‌باشد. صرف‌نظر از نوع روش، اندازه‌گیری داده‌های مورد نیاز به‌دلیل مشکل و هزینه‌بر بودن معمولاً در محل‌های محدودی انجام می‌گیرد. بنابراین تعمیم میزان تبخیرتعرق نقطه‌ای به یک سطح وسیع نیازمند استفاده از روش‌های میان‌یابی است. هرچند روش‌های میان‌یابی زیادی تاکنون توسعه یافته است ولی عملکرد آن‌ها بستگی زیادی به طبیعت متغیر اقلیمی، نحوه پراکنش مکانی ایستگاه‌ها، مقیاس زمانی و مکانی مورد مطالعه و فرضیات حاکم بر روش‌های میان‌یابی Wein و Nalder (1998) و Mardikis (2005) et al. و از طرفی تراکم ایستگاه‌ها دارد (Goovaerts, 1997). از طرفی در اراضی وسیع با توپوگرافی پیچیده، به‌کارگیری ارتفاع ایستگاه‌ها به‌عنوان متغیر کمکی در روش‌های میان‌یابی اغلب می‌تواند باعث افزایش دقت تخمین شود (Nalder and Wein, 1998; Delbari and Jahani., 2012). Ha et al. (2011) به بررسی دو روش میان‌یابی وزن‌دهی عکس فاصله (IDW) و کریجینگ معمولی (OK) برای پهنه‌بندی ET_0 در دشت تگزاس پرداختند. برای محاسبه ET_0 روزانه از معادله ASCE استفاده شد. نتایج نشان داد برای حدود ۶۸ درصد از ۲۱۷۹ روز، عملکرد روش IDW بهتر از OK بود. Carvalho et al. (2013) در پژوهش خود با داشتن اطلاعات ۳۹ ایستگاه هواشناسی واقع در ایالت میناس، برزیل و ایالت‌های اطراف آن از کریجینگ ساده (SK) و کوکریجینگ (COK) برای توصیف تغییرات مکانی ET_0 با استفاده از معادله پنمن - مانتیث و ترنت‌وایت استفاده کردند. Bo et al. (2013) با استفاده از معادله فائوپنمن - مانتیث در یک دوره آماری سه ساله (۲۰۰۵-۲۰۰۳)، تغییرات مکانی ET_0 را با استفاده چهار روش درون‌یابی اسپلاین، OK، IDW و کریجینگ باقی‌مانده (RK) محاسبه کردند. براساس نتایج حاصله روش اسپلاین ضعیف‌ترین عملکرد را نشان داد ولی اختلاف زیاد بین سه روش دیگر مشاهده نشد.

فاکتور دیگری که ممکن است بر عملکرد روش‌های میان‌یابی ET_0 تأثیر بگذارد، ترتیب مراحل تخمین ET_0 است. خطای کل برابر با مجموع خطای اندازه‌گیری، خطای روش محاسبه ET_0 و خطای میان‌یابی است (Mardikis et al., 2005). به نظر

که در آن: $\hat{Z}(u)$ مقدار تخمین زده شده متغیر مورد نظر (در اینجا تبخیر تعرق مرجع) در موقعیت u ، λ_i^{OK} وزن نسبت داده شده به مقدار متغیر در نقطه u_i ، $Z(u_i)$ مقدار مشاهده شده متغیر در نقطه u_i و $n(u)$ تعداد نقاط همسایگی می باشد. λ_i^{OK} با حل دستگاه $(n+1)$ معادله خطی زیر به دست می آید:

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^{n(u)} \lambda_j^{OK} \gamma(u_i, u_j) + \mu = \gamma(u_i, u), \quad i = 1, \dots, n(u) \\ \sum_{j=1}^{n(u)} \lambda_j^{OK} = 1 \end{cases} \quad (3)$$

که در آن: $\gamma(u_i, u_j)$ مقدار نیم تغییرنا بین تمام جفت مقادیر معلوم، μ ضریب لاگرانژ برای حداقل کردن واریانس کریجینگ و $\gamma(u_i, u)$ مقدار نیم تغییرنا بین موقعیت u و i امین نقطه نمونه برداری شده می باشد.

کوکر جینگ

این روش نوعی کریجینگ چندمتغیره می باشد که در آن از اطلاعات کمکی (بر اساس همبستگی بین متغیر اصلی و کمکی)، برای تخمین بهتر استفاده می گردد. تخمین گر کوکر جینگ به صورت رابطه زیر تعریف می گردد. (Isaaks and Srivastava, 1989).

در رابطه ۴، λ_i و w_j به ترتیب وزن های نسبت داده شده به مقادیر مشاهده ای متغیر اصلی ($Z(u_i)$) و متغیر کمکی ($E(u_j)$) در نقاط u_i و u_j ، و n و m به ترتیب تعداد متغیرهای اصلی و کمکی می باشند:

$$\hat{Z}_{COK}(u) = \sum_{i=1}^{n(u)} \lambda_i^{COK} \cdot Z(u_i) + \sum_{j=1}^{m(u)} w_j^{COK} \cdot E(u_j) \quad (4)$$

وزن دهی عکس فاصله

در این روش، رابطه اصلی تخمین همان تخمین گر کریجینگ می باشد، اما وزن ها تنها با توجه به فاصله ی هر نقطه معلوم نسبت به نقطه مجهول و بدون توجه به نحوه پراکندگی نقاط حول نقطه مورد تخمین، تعیین می شوند. مقدار وزن (λ_i) در روش IDW از رابطه زیر محاسبه می گردد:

$$\lambda_i = \frac{\frac{1}{d_i^p}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^p}} \quad (5)$$

که در آن d_i فاصله آمین نقطه مشاهده شده تا نقطه مورد تخمین، p توان وزن دهی فاصله و n تعداد نقاط مجاور می باشد.

به بیش از ۵۰ درجه سانتی گراد می رسد. میزان نزولات جوی به طور متوسط حدود ۲۲۵ میلی متر در سال می باشد. این در حالی است که میزان بارش در سواحل خزر، زاگرس و البرز به ترتیب حدود ۱۵۶۰ میلی متر، ۹۳۰ میلی متر و ۵۳۰ میلی متر می باشد و در مناطق مرکزی به ۶۳ میلی متر می رسد. این پژوهش براساس اطلاعات هواشناسی ۱۱۶ ایستگاه سینوپتیک کشور انجام گرفت. شکل (۱) موقعیت ایستگاه های هواشناسی در سطح کشور را نشان می دهد.

محاسبه تبخیر تعرق مرجع

در این پژوهش به منظور محاسبه مقدار تبخیر تعرق مرجع از روش فائو پنمن-مانتیت به عنوان روش استاندارد استفاده گردید. ارزیابی دو فرایند IC و CI برای تخمین تبخیر تعرق براساس روش فائو پنمن-مانتیت در مقیاس ماهانه و سالانه صورت گرفت. رابطه فائو پنمن-مانتیت ۵۶ به صورت زیر می باشد (Allen et al., 1998)

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma[890/(T+273)] U_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1+0.34U_2)} \quad (1)$$

در این روابط ET_0 : تبخیر تعرق مرجع (mm/day)، R_n : تابش خالص در سطح پوش گیاهی ($MJm^{-2} d^{-1}$)، T : متوسط دمای هوا در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین ($^{\circ}C$)، U_2 : سرعت باد در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین (ms^{-1})، $e_s - e_a$: کمبود فشار بخار در ارتفاع ۲ متری (KPa)، Δ : شیب منحنی فشار بخار ($KPa^{\circ}C^{-1}$)، ضریب رطوبتی ($KPa^{\circ}C^{-1}$)، G : شار گرما به داخل خاک ($MJm^{-2} d^{-1}$) می باشند.

روش های میان یابی

در این پژوهش مقادیر ET_0 در روش CI و پارامترهای هواشناسی مورد استفاده در رابطه پنمن مانیتیت در روش IC در نقاط یک شبکه منظم (با فواصل ۳۰ کیلومتری) که در سطح کل کشور تعریف شده است، میان یابی گردید. در ادامه به اختصار به روش های میان یابی مورد استفاده پرداخته شده است.

کریجینگ معمولی

کریجینگ معمولی (OK) از متداول ترین روش های میان یابی زمین آماری می باشد که در آن فرض می شود میانگین داده ها مجهول ولی مستقل از مختصات (ایستا) است. تخمین گر OK یک تخمین گر خطی وزنی ناریب می باشد که به صورت زیر تعریف می گردد (Isaaks and Srivastava, 1989):

$$\hat{Z}_{OK}(u) = \sum_{i=1}^{n(u)} \lambda_i^{OK} \cdot Z(u_i), \quad \sum_{i=1}^{n(u)} \lambda_i^{OK} = 1 \quad (2)$$

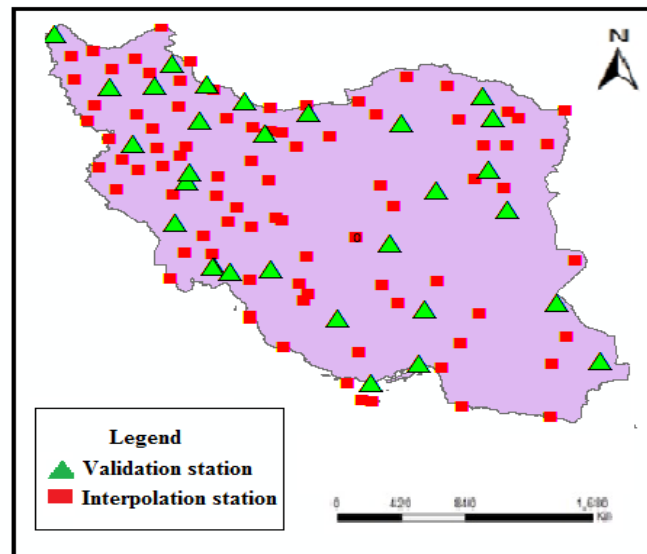


Fig. 1– Location of interpolation and validation stations over the country

شکل ۱- موقعیت ایستگاه‌های درون‌یابی و اعتبارسنجی در سطح کشور

می‌باشد. a_1, b_0, b_1, b_2 ضرایبی هستند که باید تعیین شوند تا تابع f به‌طور صریح مشخص شود.

روش ارزیابی

در این پژوهش تحلیل نیم‌تغییرنما و میان‌یابی با استفاده از حدود دوسوم ایستگاه‌ها (۸۶ ایستگاه) انجام گرفت. ارزیابی عملکرد روش‌های میان‌یابی و عملکرد دو فرایند CI و IC با استفاده از حدود یک‌سوم ایستگاه‌ها (۳۰ ایستگاه) انجام شد. معیارهای ارزیابی مورد استفاده شامل میانگین قدرمطلق خطا (MAE)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین انحراف خطا (MBE) بود (Poodineh et al., 2015).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{Z}(u_i) - Z(u_i))^2} \quad (7)$$

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{Z}(u_i) - Z(u_i)) \quad (8)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |(\hat{Z}(u_i) - Z(u_i))| \quad (9)$$

که در آن $Z(u_i)$ و $\hat{Z}(u_i)$ به‌ترتیب مقادیر برآورد شده و مشاهده شده در نقطه‌ی u_i و n تعداد مشاهدات می‌باشد.

نتایج و بحث

آماره‌های توصیفی ET_0 ماهانه و سالانه محاسبه شده به روش فائو پنمن-مانتیث برای ایستگاه‌های پیش‌بینی در جدول (۱) آمده

چند جمله‌ای محلی (LPI)

در این روش از توابع چندجمله‌ای برای میان‌یابی استفاده می‌شود؛ تعداد زیادی چندجمله‌ای بر داده‌های محدود در یک همسایگی معین برازش داده می‌شود به‌طوری‌که حداقل مجذورات متناوب را بین نقاط شنا سایی شده در محدوده بی‌ضوی شکل، به‌عنوان وزن نقطه در نظر می‌گیرد. در این روش با به‌دست آوردن تابع درجه اول، دوم و یا سوم بین مقادیر متغیر در نقاط همسایگی میان‌یابی انجام می‌پذیرد (Ruppert, 1997).

توابع پایه شعاعی (RBF)

این روش از مجموعه روش‌های دقیق میان‌یابی محسوب می‌شود که سطح برازش شده ملزم به عبور از همه‌ی نقاط اندازه‌گیری شده می‌باشد. مقادیر تخمین زده شده با این روش براساس توابع ریاضی است که با کاهش انحنای کلی سطح، نقشه‌های همواری را ایجاد می‌نماید. به‌عبارتی هدف از این روش، یافتن تابعی مانند $f(x, y)$ است به‌طوری‌که نه تنها از تمامی داده‌های موجود بگذرد، بلکه مقدار تابع انحنای آن که میزان هموار بودن تابع $f(x, y)$ را می‌سنجد، حداقل کند. فرمول ریاضی روش توابع شعاع محور به شکل عمومی زیر می‌باشد (Saghafian, 2012).

$$f(x, y) = \sum_{i=1}^n a_i E(\|x - x_i, y - y_i\|) + b_0 + b_1x + b_2y \quad (6)$$

که در آن، $\| \cdot \|$ بیان‌گر طول بردار، x و y متغیرهای مکانی، مختصات مکانی آمین نقطه مشاهده‌ای و E یک RBF

ایستگاه‌ها بررسی شد (جدول ۳). نتایج نشان داد بیشترین همبستگی متعلق به پارامترهای دمایی و کمترین همبستگی متعلق به سرعت باد می‌باشد. البته میزان همبستگی پارامترهای دمایی در فصل زمستان کمتر از سایر فصول بود. تابش خورشیدی و رطوبت نسبی تنها در ماه‌های جولای، آگوست و سپتامبر (فصل تابستان) همبستگی به نسبت خوبی با ارتفاع نشان دادند (جدول ۳). از طرفی ET_0 تنها در ماه‌های سرد سال همبستگی کمی (حدود ۰/۴) با ارتفاع نشان داد. این در حالی است که در تحقیق Vafakhah et al. (2009)، تبخیرتغرق بجز ماه‌های مهر و آبان، در سایر ماه‌ها همبستگی خوبی با ارتفاع نشان داد. از طرفی در تحقیق Shahabi far (2004)، برای محاسبه تبخیرتغرق مرجع، از متغیر کمکی ارتفاع به عنوان پارامتر موثر استفاده شده است.

است. برای داده‌های ET_0 محاسبه شده در ایستگاه‌های اعتبارسنجی نیز آماره‌های اصلی (میانگین، حداقل، حداکثر و انحراف معیار) محاسبه و در جدول (۲) ارائه شده است. با توجه به جداول (۱ و ۲)، هر دو سری از ایستگاه‌های منتخب دارای میانگین ماهانه و سالانه ET_0 مشابهی هستند. بیشترین میزان ET_0 ماهانه در ماه جولای (۳۴۳/۳۰ میلی‌متر) و در ایستگاه زابل و حداقل آن در ماه ژانویه (۶/۷۷ میلی‌متر) در ایستگاه میانه اتفاق افتاده است. با توجه به جدول (۱) بالاترین ضریب تغییرات ET_0 مربوط به ماه ژانویه (۰/۷۴) و دسامبر (۰/۷) که دارای کمترین میزان ET_0 می‌باشند، است. همچنین کمترین ضریب تغییرات ET_0 در ماه آگوست (۰/۳۵) و جولای (۰/۳۶) که بیشترین میزان ET_0 را دارند، رخ داده است. به منظور بررسی امکان استفاده از متغیر کمکی ارتفاع در تخمین بهتر ET_0 ، همبستگی پارامترهای هواشناسی و ET_0 با ارتفاع

جدول ۱- مشخصات آماری تبخیرتغرق مرجع ماهانه و سالانه ایستگاه‌های درون‌یابی (میلی‌متر)

Table1-Statistical characteristics of annual and monthly reference evapotranspiration of interpolation stations (mm)

Month	Mean	Min	Max	Standard deviation	Coefficient of variation	Skewness	Kurtosis
Jan	24.08	7.13	116.28	17.95	0.74	2.25	7.00
Feb	30.30	9.58	116.39	18.48	0.60	1.85	3.96
Mar	48.35	14.74	143.10	22.64	0.46	1.11	2.12
Apr	67.34	21.67	165.96	28.00	0.41	0.92	1.01
May	94.97	34.39	224.19	39.31	0.41	0.85	0.63
Jun	123.10	48.10	296.53	46.55	0.37	0.95	1.39
Jul	135.59	38.60	343.31	50.14	0.36	1.01	2.32
Aug	124.79	52.23	323	45.54	0.35	1.07	3.20
Sep	92.50	14.92	332.62	34.81	0.37	0.91	2.21
Oct	63.27	9.91	137.24	26.26	0.41	0.6	0.06
Nov	38.08	10.87	139.89	21.76	0.57	1.66	4.20
Dec	26.63	7.93	119.84	18.81	0.70	2.12	6.11
Annual	869	333.11	1917.96	334.18	0.38	0.84	0.82

جدول ۲- آماره‌های اصلی تبخیر- تغرق مرجع ماهانه و سالانه ایستگاه‌های اعتبارسنجی (میلی‌متر)

Table2- Main statistics of annual and monthly reference evapotranspiration of validation stations (mm)

Month	Mean	Min	Max	Standard deviation
Jan	21.53	6.77	65.53	12.98
Feb	28.25	10.97	86.61	15.02
Mar	46.24	15.26	88.13	20.79
Apr	65.00	22.13	116.75	27.20
May	94.74	32.25	183.53	37.54
Jun	123.20	45.94	225.2	45.58
Jul	134.63	53.63	225.37	46.91
Aug	123	49.75	205.31	37.65
Sep	91.00	35.00	155.45	29.18
Oct	62.56	15.25	109.64	23.97
Nov	36.42	14.67	75.41	17.68
Dec	24.05	7.74	56.61	14.27
Annual	850	332.33	1477.32	299.92

جدول ۳- ضریب همبستگی (r) پارامترهای مختلف با متغیر کمکی ارتفاع

Month	ET ₀	RH	Sunshine	T _{min}	T _{max}	T _{mean}	Wind speed
Jan	0.41	0.24	0.04	0.80	0.70	0.76	0.21
Feb	0.35	0.32	0.15	0.76	0.63	0.71	0.12
Mar	0.26	0.42	0.26	0.74	0.56	0.67	0.01
Apr	0.28	0.41	0.20	0.74	0.54	0.66	0.00
May	0.35	0.38	0.30	0.76	0.53	0.67	0.13
Jun	0.28	0.51	0.44	0.75	0.45	0.64	0.17
Jul	0.17	0.55	0.54	0.75	0.39	0.62	0.07
Aug	0.17	0.59	0.50	0.78	0.42	0.67	0.08
Sep	0.23	0.57	0.46	0.80	0.50	0.72	0.1
Oct	0.34	0.47	0.18	0.81	0.62	0.76	0.08
Nov	0.43	0.33	0.04	0.83	0.69	0.79	0.20
Dec	0.41	0.31	0.02	0.81	0.70	0.78	0.19
Annual	0.31	0.48	0.32	0.80	0.61	0.74	0.12

تحلیل نیم‌تغییرنما

در این پژوهش از تابع نیم‌تغییرنما برای بررسی همبستگی مکانی متغیرهای مورد مطالعه استفاده گردید. به‌منظور بررسی همسان‌گردی پارامترهای هواشناسی و همچنین تبخیر تعرق مرجع، نیم‌تغییرنمای جهت‌دار برای چهار جهت ۰، ۴۵، ۹۰ و ۱۳۵ درجه با استفاده از نرم افزار GS⁺ رسم گردید. نیم‌تغییرنمای جهت‌دار تبخیر تعرق ماه جولای به‌عنوان نمونه در شکل (۲) آورده شده است. همانطوری که ملاحظه می‌گردد، تغییرات نیم‌تغییرنما در چهار جهت اصلی، مشابه است. برای سایر پارامترها (دمای حداکثر، دمای حداقل، دمای میانگین، سرعت باد، رطوبت نسبی و تابش خورشیدی) نیز ناهمسان‌گردی قابل ملاحظه‌ای مشاهده نگردید. لذا از نیم‌تغییرنمای همه‌جهته (همسان‌گرد)، برای سایر مراحل پژوهش استفاده گردید. در شکل (۳)، نیم‌تغییرنمای همسان‌گرد تبخیر تعرق ماه جولای به‌عنوان نمونه نشان داده شده است.

مشخصات مدل‌های برازش شده به نیم‌تغییرنمای داده‌های پیش‌بینی تبخیر تعرق ماهانه و سالانه در جدول (۴) آورده شده است. مقادیر بالای $C/(C+C_0)$ که نشان‌دهنده درصد بالای بخش ساختاردار واریانس به بخش بدون ساختار آن است، دلالت بر همبستگی مکانی بالای ET₀ در سطح کشور دارد. طبق جدول (۴) دامنه تغییرات $C/(C+C_0)$ از ۰/۶۲ تا ۰/۸۶ می‌باشد. در تحقیق Noshadi و Sepaskhah (2005) نیز دامنه تغییرات $C/(C+C_0)$ از ۰/۶۲ تا ۰/۸۰ متغیر بود و مناسب‌ترین مدل برازش شده به نیم‌تغییرنمای تجربی تبخیر تعرق، مدل کروی بود. در این پژوهش نیم‌تغییرنمای ET₀ ماهانه (ماه‌های مارس، آوریل، سپتامبر

و اکتبر) و سالانه از مدل کروی پیروی کرده است. Vafakhah et al (2004) در ماه‌های خرداد، تیر و شهریور مدل نمایی و در بقیه ماه‌ها مدل کروی مناسب‌ترین بوده است. با توجه به جدول (۴) حداکثر آستانه نیم‌تغییرنما مربوط به ماه مه (۰/۲۷ (mm)²) و پس از آن، ژوئن، جولای و آگوست بود که نشانگر بالابودن واریانس داده‌های ET₀ و همچنین مقادیر حداکثر ET₀ برای این ماه‌ها می‌باشد. علاوه بر این مقادیر شعاع تأثیر از ۱۱۱ کیلومتر در فوریه تا ۱۸۸۷ کیلومتر در مه تغییر می‌کند. برای اجرای روش IC، تحلیل همبستگی مکانی پارامترهای هواشناسی معادله فائو پنمن مانیتینگ انجام و مشخصات بهترین مدل تئوری تعیین گردید که به دلیل حجم زیاد اطلاعات، به طور نمونه فقط برای ماه جولای در جدول (۵) ارائه شده است. با توجه به این نتایج، حداکثر حد آستانه برای دمای حداکثر، دمای حداقل و دمای میانگین به ترتیب برابر با ۸۲/۴، ۷۹/۴ و ۸۳/۴ میلی‌متر مربع مربوط به ماه ژانویه می‌باشد و حداکثر شعاع تأثیر مربوط به ماه‌های ژانویه برای دمای حداکثر (۲۴۴۲ کیلومتر) و مارس برای دمای حداقل و میانگین (به ترتیب برابر با ۲۴۴۲ و ۶۷۷۱ کیلومتر) می‌باشد. مدل نیم‌تغییرنمای رطوبت نسبی نشان داد که حداکثر آستانه (۲/۱۹/۴ (%)) در ماه مه و حداکثر شعاع تأثیر (۹۹۹ کیلومتر) در ماه ژانویه رخ داده است. برای تابش خورشیدی نیز حداکثر شعاع تأثیر (۳۴۴۱ کیلومتر) در ماه فوریه و حداکثر آستانه (۷۱۳۰ (MJm⁻²d⁻¹)) مربوط به ماه دسامبر می‌باشد. از طرفی مدل ساختار مکانی پارامترهای هواشناسی مورد بررسی، غالباً کروی یا نمایی بود.

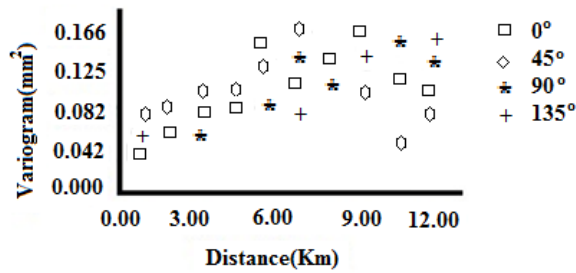


Fig 2 - Directional semivariogram for July evapotranspiration
 شکل ۲- نیم تغییر نمای جهت دار تبخیر تفرق ماه جولای

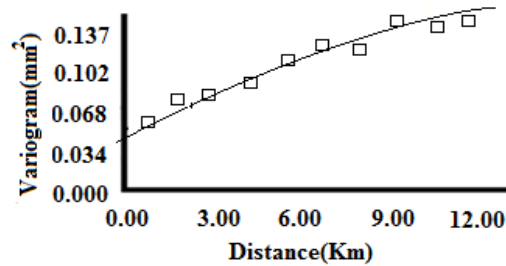


Fig 3 - Experimental isotropic semivariogram (opened square) and the best fitted model (solid line) for July evapotranspiration

شکل ۳- نیم تغییر نمای همسانگرد تجربی (مربع توخالی) و مدل برازش شده (خط ممتد) برای تبخیر تفرق ماه جولای

جدول ۴- مشخصات مدل های نیم تغییر نمای برازش شده به داده های تبخیر تفرق مرجع

Table 4 - Characteristics of semivariogram models fitted to the reference evapotranspiration data

Month	Model	$C_0 + C$ (mm) ²	C_0 (mm) ²	A_0 (km)	$\frac{C}{(C + C_0)}$
Jan	Spherical	0.12	0.05	213	0.73
Feb	Spherical	0.11	0.02	111	0.75
Mar	Spherical	0.08	0.03	183	0.73
Apr	Spherical	0.07	0.02	207	0.73
May	Spherical	0.27	0.02	1887	0.79
Jun	Spherical	0.15	0.04	1221	0.71
Jul	Spherical	0.12	0.04	1110	0.69
Aug	Spherical	0.13	0.04	933	0.62
Sep	Spherical	0.13	0.04	922	0.68
Oct	Spherical	0.01	0.03	777	0.86
Nov	Spherical	0.09	0.03	222	0.62
Dec	Spherical	0.22	0.02	743	0.87
Annual	Spherical	0.08	0.01	238	0.97

جدول ۵- مشخصات مدل های نیم تغییر نمای برازش شده به متغیرهای هواشناسی برای ماه جولای

Table 5 - Characteristics of semivariogram models fitted to the meteorological variables for July

Variable	Model	$C_0 + C$	C_0	A_0 (km)	$\frac{C}{(C + C_0)}$
T_{mean}	Exponential	5.07	19.91	777	0.74
T_{max}	Exponential	2.07	19.23	199	0.89
T_{min}	Exponential	5.70	52.40	1409	0.89
RH	Exponential	0.00	0.23	732	0.98
Sunshine	Exponential	822	2302	222	0.64
Wind speed	Exponential	0.05	0.10	333	0.50

جدول ۶- نتایج اعتبار سنجی روش‌های میان‌یابی OK، IDW، LPI، RBF و COK و دو فرایند CI و IC
 Table 6- Validation results of OK, IDW, LPI, RBF and COK intermediation methods and two processes of IC and CI

Parameter	Process	Method	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Annual
RMSE(mm)	IC	OK	4.48	9.20	8.72	11.85	20.39	27.85	30.32	26.13	15.13	10.32	5.16	5.22	159.50
		IDW	4.72	5.82	10.11	11.75	19.84	27.67	29.67	25.65	14.78	9.49	4.64	5.04	149.22
		LPI	9.35	10.44	14.38	16.93	21.59	28.36	32.77	28.65	26.32	14.61	11.79	9.77	203.00
		RBF	10.40	11.20	14.40	16.98	20.48	27.56	31.82	27.90	25.20	13.75	11.79	9.83	200.00
		COK	7.25	5.38	8.86	9.49	25.23	28.75	31.77	28.40	16.52	9.95	4.13	3.24	179.00
RMSE(mm)	CI	OK	7.56	8.94	13.13	16.87	19.99	29.68	33.00	32.69	19.71	13.67	9.97	7.53	185.75
		IDW	6.73	8.19	11.26	14.09	18.23	27.04	29.27	24.14	16.87	12.46	8.79	7.39	154.81
		LPI	10.75	11.02	14.04	16.75	23.64	31.57	36.85	33.23	25.59	17.44	12.87	11.13	202.00
		RBF	11.24	11.27	14.29	16.82	22.89	30.79	35.90	32.23	24.25	16.62	12.87	11.56	201.00
		COK	7.56	9.06	12.60	15.93	22.86	31.99	35.80	29.48	19.42	12.93	9.85	8.45	186.52
MBE (mm)	IC	OK	-0.22	-0.58	-4.57	-7.28	-15.75	6.66	-21.87	-23.95	-20.84	-10.60	-6.95	-1.25	-113.40
		IDW	-0.41	-0.10	-5.36	-6.96	-15.67	-22.05	-23.80	-20.47	-10.11	-6.51	-0.96	-0.86	-113.10
		LPI	-0.13	-0.21	-0.14	0.17	0.03	0.56	1.68	1.84	1.30	0.95	0.30	-0.02	6.32
		RBF	-0.44	-0.34	-0.10	0.15	0.08	0.48	0.36	1.80	1.40	0.32	0.36	-0.08	4.40
		COK	5.45	1.24	-4.61	-0.13	-0.17	-22.65	-25.98	-23.00	-11.16	-6.87	-0.93	-0.25	-109.06
MBE (mm)	CI	OK	2.76	-1.39	2.04	3.80	2.45	5.81	8.18	10.26	5.51	2.39	2.28	2.02	44.26
		IDW	-0.03	0.11	-0.73	0.47	-1.27	-0.67	0.75	-0.92	-0.23	-1.21	-0.57	0.066	-7.46
		LPI	-0.07	-0.23	-0.76	-1.19	-1.52	-1.05	-1.69	-0.70	-0.45	0.62	-0.51	0.35	-1.00
		RBF	-0.67	-0.54	-0.43	-0.37	-0.70	-0.91	-0.85	-0.70	-0.56	-0.43	-0.51	-0.63	-1.05
		COK	0.10	0.24	0.46	0.84	1.42	2.07	1.96	1.59	1.27	0.95	0.74	0.21	11.91
MAE(mm)	IC	OK	3.34	7.68	6.86	9.46	16.71	22.93	25.50	22.38	12.39	8.42	3.93	4.11	129.95
		IDW	3.57	4.14	7.87	9.27	16.21	22.84	25.07	21.83	11.92	7.76	3.66	4.04	128.30
		LPI	7.25	7.77	10.63	12.91	16.42	22.73	27.20	23.61	16.04	11.08	8.85	7.77	146.05
		RBF	7.28	7.93	10.86	12.96	16.66	22.79	26.80	23.53	15.49	10.66	8.94	7.63	152.60
		COK	5.92	3.49	7.25	7.58	21.12	24.06	27.33	24.80	13.88	8.42	3.23	2.47	148.67
MAE(mm)	CI	OK	5.85	7.36	10.65	13.16	15.75	25.25	28.43	26.74	16.11	7.76	8.50	6.16	151.26
		IDW	5.52	6.65	8.99	10.92	15.05	22.61	24.76	20.41	14.22	11.08	7.24	6.20	132.20
		LPI	6.34	6.77	9.26	11.74	16.92	23.86	26.9	24.80	18.81	10.66	8.45	7.03	154.11
		RBF	3.55	7.04	9.64	11.81	16.96	23.93	26.85	24.80	18.38	8.42	8.45	7.10	154.80
		COK	6.00	7.22	9.94	13.04	16.85	24.25	27.00	23.63	16.19	11.59	8.16	6.96	156.00

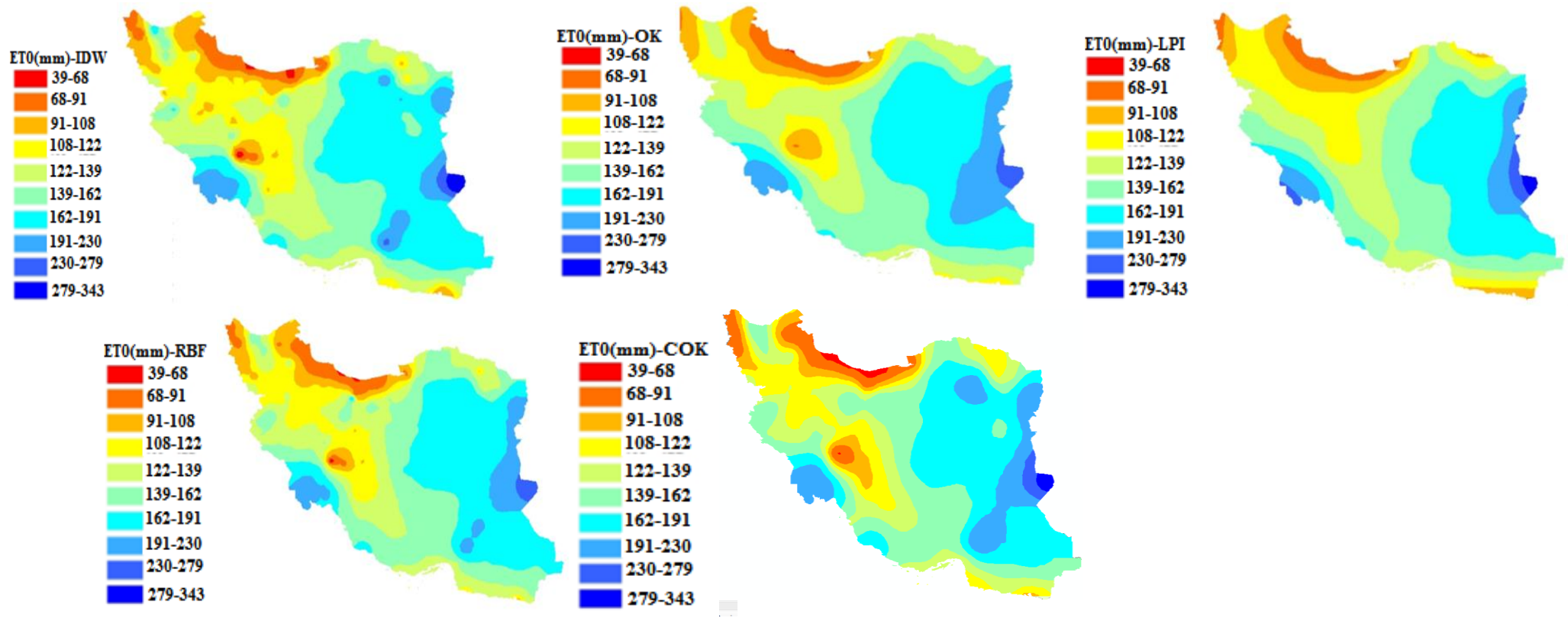


Fig4 – Mapping of reference evapotranspiration for July

شکل ۴- نقشه پهنه‌بندی تبخیر تفرق مرجع ماه جولای

پهنه‌بندی ET₀

در جدول (۶)، نتایج اعتبارسنجی دو فرایند CI و IC برای برآورد ET₀ ارائه شده است. مشاهده می‌شود که به‌طور کلی صرف‌نظر از نوع روش میان‌یابی، در بیشتر ماه‌ها و در مقیاس سالانه، فرایند IC دارای عملکرد بهتری نسبت به فرایند CI در برآورد ET₀ می‌باشد. این در حالی است که در تحقیق Mardikis et al. (2005) دو فرایند IC و CI از عملکرد مشابهی برخوردار بودند. بهترین روش میان‌یابی در فرایند IC براساس RMSE و MAE برای ماه‌های سپتامبر، اکتبر و سالانه، روش IDW، برای ماه‌های ژانویه و مارس، روش OK و برای ماه‌های فوریه، آوریل، نوامبر و دسامبر، روش COK بود (جدول ۶). روش IDW و فرایند CI با اختلاف کمی نسبت به فرایند IC، کمترین RMSE را در تخمین ET₀ ماه‌های مه، ژوئن، جولای و آگوست دارا بود.

در مقایسه روش‌های میان‌یابی مشخص شد که در هر دو فرایند IC و CI روش‌های OK، COK و IDW که به‌نوعی تأثیر فاصله بین ایستگاه‌ها را در فرایند تخمین لحاظ می‌کنند، عملکرد بهتری نسبت به روش‌های LPI و RBF داشته‌اند. از طرفی مشخص شد که در شش ماه از سال و نیز در مقیاس سالانه، روش IDW بهترین عملکرد را در تخمین ET₀ داشته است. در تحقیق Karimi Jafari و Eslamian (2011) و Ha et al (2011) نیز روش IDW به‌عنوان روش مناسب تخمین ET₀ معرفی شد. از طرفی دلیل عملکرد بهتر روش COK (فرایند IC) در ماه‌های آوریل، فوریه، نوامبر و دسامبر به دلیل بالاتر بودن ضریب همبستگی متغیرهای دمایی با ارتفاع در این ماه‌ها (ماه‌های سرد سال) نسبت به سایر ماه‌ها می‌باشد. همچنین دلیل بهبود عملکرد COK در فرایند IC نسبت به CI را می‌توان اینگونه تفسیر کرد که در فرایند IC، ابتدا متغیرهای هواشناسی میان‌یابی می‌شوند و از آنجا که متغیرهای دمایی همبستگی بالایی با ارتفاع در ماه‌های سرد سال دارند، تخمین آن‌ها با کمک داده‌های ارتفاع از دقت بیشتری برخوردار بوده و لذا دقت ET₀ برآورد شده نیز بیشتر شده است. در روش COK (CI)، ابتدا ET₀ محاسبه شده و سپس با کمک ارتفاع تخمین زده می‌شود و از طرفی ضریب همبستگی ET₀ در ماه‌های مشابه، کمتر از همبستگی متغیرهای دمایی با ارتفاع است. نکته قابل توجه دیگر این است که هرچند در مجموع فرایند IC و روش‌های کریجینگ (با و بدون متغیر کمکی) و IDW از دقت بیشتری (RMSE و MAE کمتر) در برآورد ET₀ برخوردار بودند، میزان انحراف این روش‌ها در این فرایند به‌ویژه در ماه‌های مارس تا اکتبر بیشتر از اعمال همین روش‌ها در فرایند CI بود. به‌نظر می‌رسد میان‌یابی متغیرهای هواشناسی در ماه‌های به‌نسبت گرم سال و سپس محاسبه ET₀ باعث انتشار خطای انحراف زیادتر نسبت به روش CI شده است. علاوه بر این با توجه به مقادیر MBE در اکثر دوره‌ها هر دو روش OK و COK در فرایند IC تمایل به کم‌برآورد و در فرایند CI تمایل به بیش‌برآورد

ET₀ داشته‌اند. Marks و Philips (1996) و Bechini et al (2000) در تحقیقات خود گزارش کردند که انتظار می‌رود خطای IC بیشتر از CI باشد چراکه خطا در فرایند IC، حاصل جمع خطاهای میان‌یابی متغیرهای ورودی می‌باشد. در تحقیق حاضر دو روش LPI و RBF در هر دو فرایند تخمین، به‌طور مشابه عملکرد ضعیفی نسبت به سایر روش‌های میان‌یابی داشتند.

به‌طور کلی مقایسه نتایج اعتبارسنجی روش‌های میان‌یابی در فرایند IC، با نتایج اعتبارسنجی روش‌های میان‌یابی در فرایند CI نشان می‌دهد روش IC (بجز در ماه‌های ژوئن، جولای و آگوست) دارای دقت بیشتری نسبت به فرایند CI است. بنابراین برای فصل تابستان استفاده از روش CI مناسب‌تر است.

به منظور تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی تبخیرتعرق ابتدا شبکه منظمی از نقاط در سطح منطقه مورد مطالعه با استفاده از نرم افزار Global Mapper ۱۶ گرفته شده و با در نظر گرفتن فواصل ۳۰×۳۰ کیلومتر با طول و عرض مشخص تعیین شد. سپس پهنه‌بندی تبخیرتعرق مرجع از طریق فرایند IC (با توجه به اینکه غالباً عملکرد مناسبی نشان داد) و با استفاده از پنج روش میان‌یابی OK، IDW، LPI و RBF و COK در محیط نرم‌افزار ArcGis 9.3 انجام شد. سپس الگوی توزیع مکانی تبخیرتعرق ماهانه و تبخیرتعرق مرجع سالانه در ده کلاس ترسیم شد که به دلیل حجم زیاد اطلاعات الگوی توزیع مکانی تبخیرتعرق ماه جولای به طور نمونه در شکل (۴)، آورده شده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد نقشه‌های تولید شده توسط روش IDW در برخی نقاط به صورت لکه‌ای بوده و تا حدودی مشابه نقشه‌های ترسیم شده به روش RBF می‌باشد. وجود لکه‌های چشم‌گاو مانند در نقشه‌های تولید شده توسط روش IDW، از مشخصات این روش است (Delbari et al., 1991). از طرفی روش OK نقشه‌های هموارتری ایجاد کرده است. نقشه‌های ترسیم شده به روش LPI پراکنش مکانی ET₀ را غالباً بسیار هموار نشان می‌دهند که از این نظر با طبیعت متغیر ET₀ در مناطق مختلف کشور خیلی همخوانی ندارد. همانطور که نتایج آماری ارزیابی روش‌ها نشان داد روش COK بهترین عملکرد را در ماه‌های سرد سال داشت. با بررسی نقشه‌ها نیز مشاهده می‌شود روش COK تصویر بهتری از پراکنش مکانی ET₀ در دوره‌های مورد بررسی به ویژه ماه‌های اکتبر، ژانویه و آوریل فراهم کرده است. بررسی نقشه‌های تبخیرتعرق مرجع ماهانه نشان می‌دهد در ماه‌های سرد سال (دسامبر، ژانویه و فوریه)، حداکثر تبخیرتعرق غالباً در نواحی جنوبی و غربی کشور رخ می‌دهد اما با نزدیک شدن به ماه‌های گرم سال (ژوئن، جولای، آگوست) از میزان تبخیرتعرق در نواحی جنوبی کاسته شده و بیشترین مقدار تبخیرتعرق اغلب در نواحی شرقی و غرب کشور رخ می‌دهد. مناطق دارای تبخیرتعرق کمتر، بیشتر در شمال و شمال غرب کشور در نواحی کم ارتفاع ساحلی و همچنین در دامنه‌های شمالی رشته کوه البرز قرار دارند. وجود رشته کوه البرز در شمال کشور سبب توقف توده هوای مرطوب حاصل از دریای خزر در

به ویژگی‌های متغیر مورد مطالعه بستگی دارد. روش IDW تقریباً در اکثر دوره‌ها از عملکرد خوبی در تخمین ET_0 برخوردار بود. دلیل آن بر طبق Price et al. (2000) می‌تواند این باشد که روش وزن‌دهی بیشتر برای مناطقی مناسب است که تغییرات مکانی متغیر مورد مطالعه آرام است. از طرفی معمولاً روش‌های زمین‌آماره‌ای نیاز به تراکم مناسبی از نقاط نمونه‌برداری برای نیل به عملکرد ایده‌آل دارند (Goovarets, 1997). از طرف دیگر باید توجه داشت که روش IDW نسبت به روش‌های زمین‌آماره‌ای خیلی ساده‌تر و سریع‌تر می‌باشد. اضافه کردن ارتفاع در میان‌یابی پارامترهای دمایی و استفاده از روش کوکریجینگ منجر به تخمین مناسب‌تر ET_0 در فرآیند IC به‌ویژه در ماه‌های سرد سال و در مقیاس سالانه شد. این نتیجه با یافته‌های Mardikis et al. (2005) که استفاده از متغیر کمکی را در بهبود عملکرد فرایندهای تخمین ET_0 سودمند دانستند، مطابقت دارد. در مجموع مقایسه فرایندهای IC و CI برای تخمین ET_0 ماهانه و سالانه نشان داد که فرایند IC برای اکثر دوره‌ها بجز ماه‌های ژوئن، جولای و آگوست دارای عملکرد بهتری نسبت به فرایند CI است. این نتایج با یافته‌های Mardikis et al. (2005) که عملکرد دو فرایند مذکور را مشابه گزارش کردند و یا تحقیقات Philips و Marks (1996) و Bechini et al. (2000) که خطای IC را بیشتر از CI گزارش کردند، مطابقت ندارد. دلیل این اختلاف را می‌توان تا حدودی به غیرخطی بودن معادله فائو پنمن-مانتیت نسبت داد. بر طبق نظر Bechini et al. (2000)، فرایند CI بایستی زمانی که مدل مورد نظر غیرخطی است، ترجیح داده شود. تحت چنین شرایطی، میان‌یابی صحیح متغیرهای ورودی مدل از اهمیت زیادی برخوردار خواهد بود.

تقدیر و تشکر

نویسندگان مقاله از سازمان هواشناسی کشور برای در اختیار گذاشتن داده‌های خام مقاله سپاسگزاری می‌نمایند.

ناحیه شمالی کشور شده و لذا رطوبت بالا و وجود جنگل‌های شمال در کاهش تبخیرتورق تأثیر دارند (Rahimzadeh and Khoshkam, 2003). افزون بر آن بارش زیاد و دمای پایین نیز در تبخیرتورق کمتر ناحیه شمالی کشور مؤثر است (Khodaghohi et al., 2006). بالا بودن پتانسیل تبخیرتورق در سایر نواحی کشور نیز می‌تواند ناشی از کاهش پوشش گیاهی به‌واسطه تقلیل بارش و برودت هوا و تأثیر گذاری دیگر عوامل اقلیمی در مقدار تبخیرتورق باشد (Khodaghohi et al., 2006).

می‌توان گفت افزایش تبخیرتورق مرجع در عرض‌های جنوبی کشور می‌تواند ناشی از تابش زیاد خورشید و گرمایش سطح زمین به دلیل ضعف نسبی پوشش گیاهی باشد. همچنین عرض‌های جنوبی کشور در ارتفاع از سطح دریای کمتری نسبت به نیمه بالایی واقع است و بدین ترتیب کاهش تبخیرتورق در نیمه ی بالایی را می‌توان ناشی از کاهش گرادیان دما نسبت به ارتفاع هم دانست. Zare Abyaneh (2010) نیز حداقل تبخیرتورق مرجع را در محدوده شمال و شمال غرب کشور و حداکثر آن را در دو بخش شرق و غرب کشور تشخیص دادند.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق تغییرات مکانی، فرایندها و روش‌های مختلف میان‌یابی تبخیرتورق مرجع در سطح کشور مورد بررسی قرار گرفت. آماره‌های محاسبه شده نشان داد که بیشترین ضریب تغییرات در ماه‌های سرد سال (دارای کمترین ET_0) و کمترین ضریب تغییرات در ماه‌های گرم سال (دارای بیشترین ET_0) رخ داده است. نتایج نشان داد که به‌طور کلی تقریباً غیرممکن است که بتوان روش میان‌یابی که بهترین عملکرد را برای همه ماه‌ها دارد، تعیین کرد زیرا که مشخصات متغیرهای هواشناسی مورد مطالعه از ماهی به ماه دیگر فرق می‌کند. همانطوری که Nalder و Wein (1998) بیان کردند عملکرد روش‌های زمین‌آماره‌ای به‌میزان زیادی

References

- 1- Ansari, H., Sharifian, H. and Davari, K., 2010. *Principles and operation of irrigation, Ferdowsi University of Mashhad Publications*. (In Persian).
- 2- Allen, R.G., Raes, L.S. and Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration guidelines for computing crop Water requirements, *FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56*, FAO, Rome, Italy. 301 p.
- 3- Bo, T., Ling, T. and Shaozhong, K., 2013. Effects of spatial station density and interpolation methods on accuracy of reference crop evapotranspiration, *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 29(7), pp 60-66.
- 4- Bechini, L., Ducco, G., Donatelli, M. and Stein, A. 2000. Modelling, interpolation and stochastic simulation inspace and time of global solar radiation. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 81, pp. 29-42.

- 5- Carvalho Alves, M., Carvalho, L.G., Vianello, R.L., Sediya, G.C., Diveira, M.S. and Sajunior A., 2013. Geostatistical improvements of evapotranspiration spatial information using satellite land surface and weather stations data. *Theoretical and Applied Climatology*, 113 (1-2), pp. 155-174.
- 6- Dehghan, H. and Alizadeh, A., 2012. Evaluation and calibration of different methods for estimating the evapotranspiration of the reference plant in the conditions of climatic data limitation (Case study: Khorasan Razavi province). *Journal of Water and Soil*, 26 (1), pp. 236-250. (In Persian).
- 7- Delbari, M. and Jahani, S., 2012. Evaluating the effect of using digital elevation model (DEM) on estimating monthly and annual rainfall in Golestan province. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 6 (2), pp. 118-132. (In Persian).
- 8- Goovaerts, P., 1997. *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*. Oxford University Press, New York.
- 9- Ha, W., Gowda, P., Oommen, T., Marek, T., Porter, D., and Howell, T., 2011. Spatial interpolation of daily reference evapotranspiration in the Texas high plains. *World Environmental and Water Resources Congress 2011*, pp. 2796-2804.
- 10- Isaaks, E.H. and Srivastava, R.M., 1989. *An Introduction to Applied Geostatistics*. New York: Oxford University Press.
- 11- Karimi Jafari, M., Eslamian, S. 2011. Evaluation of geostatistical methods in estimating potential evapotranspiration. *First National Conference on Meteorology and Agricultural Water Management*. (In Persian)..
- 12- Khodaghali, M., Masoodian, S.A., Kaviany, M.R. and Kamaley, G.h., 2006. A survey of Phytoclimatology of zayanderoud basin. *Pajouhesh va Sazandegi*, 70, pp. 41-53.
- 13- Mardikis, M.G., Kalivas, D.P. and Kollias, V.J., 2005. Comparison of interpolation methods for the prediction of reference evapotranspiration—an application in Greece. *Water Resources Management*, 19, pp. 251–278.
- 14- Majidi, M. and Alizadeh, A. 2011. Investigating the effect of non-existent meteorological data and their estimation methods on the accuracy of estimating reference evapotranspiration and ranking equations in different climatic conditions. *Journal of Water and Soil*, 25 (6), pp. 1503-1519. (In Persian).
- 15- Nalder, I.A. and Wein, R.W., 1998. Spatial interpolation of climatic normals test of a new method in the Canadian boreal forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 92, pp. 211–225.
- 16- Noshadi, M. and Sepaskhah, A.R., 2005. Application of geostatistics for potential evapotranspiration estimation. *Iranian Journal of Science and Technology, Transaction of Civil Engineering*, 29 (3), pp. 343-355.
- 17- Phillips, D.L. and Marks, D G., 1996. Spatial uncertainty analysis: propagation of interpolation errors in spatially distributed models. *Ecological Modeling*, 91(1), pp. 213-229.
- 18- Price, M, Low, R.G. and McCann, C., 2000. Mechanisms of water storage and flow in the unsaturated zone of the Chalk aquifer. *Journal of Hydrology*, 233 (4), pp. 54-71.
- 19- Poodineh, h., Haghghat joo, P. and Amiri, M., 2015. Spatial analysis of precipitation changes by considering the variables of altitude and distance to the sea (Case study: Sistan and Baluchestan province). *Natural Geography Research*, 40 (4), pp. 636-607. (In Persian).
- 20- Ruppert, D., 1997. Local polynomial regression and its applications in environmental statistics. *Statistics for the Environment*, 3, pp.155-173.
- 21- Rahimzadeh, F. and Khoshkam, M., 2003. Moisture series changes in country synoptic stations. *The third Regional Conference and the first Climate Change National Conference*,. Isfahan University of Technology. (In Persian).

-
- 22- Rezaei, M. and Zolfaghari, B., 2014. Water is a factor for achieving sustainable development in arid regions, *The Second International Congress of Structures, Architecture and urban development*. (In Persian).
- 23- Smith, K., 2014. *Estimation Methods of Reference Evapotranspiration at Unsampled Locations. Degree of Master of Science*, New Mexico Institute of Mining and Technology.
- 24- Saghafian, B., 2012. Guide to spatial distribution methods of climatic factors using point data. *Journal of Deputy Minister of Strategic Supervision of the Ministry of Energy*, pp. 94-95. (In Persian).
- 25- Shahabi far, M. 2004. Estimation of regional reference evapotranspiration using geostatistics and geographic information system in Tehran province, PhD Thesis, *Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University*. (In Persian).
- 26- Vilanova, M.R.N., Simoes, Silvio. J.C. and Isabel, Trannin, C.B., 2012. Geospatial interpolation of reference evapotranspiration (ETo) in areas with scarce data: case study in the south of Minas Gerais, Brazil, *Ambiente and Água. An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, 7 (2), pp. 179-194.
- 27- Vafakhah, M., Mohseni Saravi, M. and Ongh, M. 2009. Comparison of geostatistical methods in estimating potential evapotranspiration. *Journal of Watershed Management Research*, 83, pp. 30-39. (In Persian).
- 28- Zhao, W., Bing, L. and Zhihui, Z., 2010. Water requirements of maize in the middle Heihe River basin China. *Agricultural Water Management*, 97 (2), pp. 215-223.
- 29- Zare Abyaneh, H., Bayat varkashi, M., Sabzi parvar, A., Maroofi, S. and ghasemi, A., 2010. Evaluation of different methods for estimating the evapotranspiration of the reference plant and its zoning in Iran. *Journal of Natural Geography Research*, 74, pp. 95-110. (In Persian).