



Estimation of Rainfall Erosivity Map in Areas with Limited Number of Rainfall Station (Case study: Semnan Province)

Elham Amini¹, Ali Asghar Zolfaghari^{2✉}, Seyed Hasan Kaboli³, Mohammad Rahimi⁴

1. Department of Desertification, Faculty of Desert Science, Semnan University, Semnan, Iran, Email:

eamini6886@gmail.com

2. Corresponding Author, Department of Arid Lands Management, Faculty of Desert Science; Semnan University, Semnan, Iran, Email: azolfaghari@semnan.ac.ir

3. Department of Arid Lands Management, Faculty of Desert Science; Semnan University, Semnan, Iran, E-mail: hkaboli@semnan.ac.ir

4. Department of Desertification, Faculty of Desert Science, Semnan University, Semnan, Iran, E-mail: mrahimi@semnan.ac.ir

Article Info

ABSTRACT

Article type: Research Article

Article history:

Received: May. 28, 2021

Revised: Sep. 23, 2022

Accepted: Sep. 26, 2022

Published online: Nov. 22, 2022

Keywords:

Auxiliary variables,
Precipitation map,
Random Forest model.

Water erosion is one of the most important challenges of agriculture and watershed management in the world and it has been considered by many researchers. To estimate water erosion, many experimental models have been proposed, of which the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) is one of the most widely used models for estimation of soil erosion. Rainfall erosivity (R) is one of the factors in this model. Direct calculation of R required meteorological gauge stations which are available at a limited number of synoptic stations. In this study, the attempt was to estimate rainfall erosivity using available data such as annual rainfall. Semnan province, with an area of 96816 km², has a limited number of synoptic and rain gauge stations, makes it difficult to estimate rain erosivity in this province. In this study the auxiliary variables including digital elevation model (DEM), normalized vegetation index (NDVI), land surface temperature (LST) and global precipitation network data "Open Land Map Precipitation" (LMP) were used for spatial prediction of annual rainfall. The rainfall map of the study area was prepared using auxiliary data and using random forest (RF) model. Also in synoptic stations, the amount of erosivity was determined based on the EI30 index and average annual rainfall. Finally, the relation between rainfall and erosivity and annual rainfall was determined using nonlinear regression. Root mean square error (RMSE) and correlation coefficient (r) of RF model for prediction of annual rainfall were 16.9 mm and 0.98, respectively. The results of the rainfall map in the study area showed that the rainfall varied between 70-420 mm year⁻¹. Rainfall classification maps showed that near the half of the study area has annual rainfall less than 100 mm, 30% of the province has annual rainfall of between 100 and 150 mm and only about 17% of the province has annual rainfall more than 150 mm year⁻¹. The maximum and minimum values of erosivity were 380 and 39 MJha⁻¹mm h⁻¹year⁻¹ in the northern and southern part of the study area, respectively. Our results indicated using new method of data mining, it is possible to spatial prediction of rainfall and erosivity, especially in areas with small number of synoptic stations.

Cite this article: Rajaei, Amini, A., Zolfaghari, A. A., Kaboli, S. H., Rahimi, M. (2022) Estimation of rainfall erosivity map in areas with limited number of rainfall station (Case study: Semnan province), *Iranian Journal of Soil and Water Research*, <http://doi.org/10.22059/ijswr.2022.343710.669279>, 53 (9), 2027-2044.

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.



DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.343710.669279>

برآورد نقشه‌های فرساینده‌گی و بارش در مناطقی با ایستگاه باران‌سنجی محدود (مطالعه موردی: استان سمنان)

الهام امینی^۱، علی اصغر ذوالفقاری^۲، سید حسن کابلی^۳، محمد رحیمی^۴

۱. گروه بیابان‌زدایی، دانشکده کویرشناسی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران، ایمیل: eamini6886@gmail.com

۲. نویسنده مسئول، گروه مدیریت مناطق خشک، دانشکده کویرشناسی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران، ایمیل: azolfaghari@semnan.ac.ir

۳. گروه مدیریت مناطق خشک، دانشکده کویرشناسی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران، ایمیل: hkaboli@semnan.ac.ir

۴. گروه بیابان‌زدایی، دانشکده کویرشناسی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران، ایمیل: mrahimi@semnan.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	برای برآورد فرسایش آبی معادلات تجربی زیادی ارائه شده که معادله جهانی فرسایش خاک اصلاح شده (RUSLE) یکی از پرکاربردترین این معادلات بود. یکی از فاکتورها این معادله، فرساینده‌گی باران (R) می‌باشد. برای محاسبه مستقیم R نیاز به داده‌های دقیقه‌ای بارش است که در تعداد محدودی از ایستگاه‌های سینوپتیک وجود دارد و دسترسی به این داده‌ها با مشکلاتی همراه است. در این پژوهش با استفاده از داده‌های در دسترس مانند متوسط بارش سالانه، مقدار فرساینده‌گی باران برآورد شد. استان سمنان با وسعتی برابر با ۹۶۸۱۶ کیلومتر مربع، دارای تعداد محدودی ایستگاه سینوپتیک و باران‌سنجی است، که برآورد فرساینده‌گی باران را در این استان، دشوار می‌کند. در این مطالعه به منظور برطرف ساختن کمبود ایستگاه‌های باران‌سنجی و سینوپتیک، از متغیرهای کمکی شامل ارتفاع (DEM)، پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI)، دمای سطح زمین (LST) و داده‌های شبکه‌ای جهانی بارش "Open Land Map Precipitation (LMP)" که بیشترین ارتباط را با بارش داشتند، استفاده شد. برای این منظور ابتدا با استفاده از داده‌های کمکی و مدل غیرخطی جنگل تصادفی (RF) نقشه بارش استان تهیه شد. در ایستگاه‌های سینوپتیک مقدار فرساینده‌گی بر اساس شاخص EI30 و متوسط بارندگی سالانه ایستگاه‌ها تعیین و ارتباط بین بارش و فرساینده‌گی باران با استفاده از رگرسیون غیرخطی تعیین شد. نتایج نشان داد مقدار مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب همبستگی (r) مدل RF در برآورد بارش ایستگاه‌های مورد توجه برابر با ۱۶/۹ میلی‌متر و (0.01) p < 98/0 بود، که نشان از دقت بالای این مدل در برآورد بارش استان می‌باشد. نقشه بارش استان نشان داد که میزان بارش سالانه مناطق مختلف استان بین ۴۲۰-۷۰ میلی‌متر متغیر می‌باشد. نقشه‌های طبقه‌بندی بارش نشان داد که نیمی از استان دارای بارش کمتر از ۱۰۰ میلی‌متری می‌باشد. ۳۰ درصد استان بارشی بین ۱۰۰ تا ۱۵۰ میلی‌متری دارند و تنها حدود ۱۷ درصد از سطح استان بارشی بیش از ۱۵۰ میلی‌متر را دارا است. بررسی رگرسیون‌های خطی و غیرخطی نشان داد که تابع توانی به خوبی قادر به برآورد فرساینده‌گی باران با استفاده از داده‌های متوسط بارش سالانه بود. به‌طوری که ضریب همبستگی معادله‌ای که فرساینده‌گی را به عنوان تابعی از بارش برآورد می‌کند، برابر با 0.96^{**} بدست آمد. بیشترین و کمترین مقادیر فرساینده‌گی باران به ترتیب برابر با ۳۸۰ و ۳۹ MJha-1mm h-1year-1 در مناطق شمالی و جنوبی استان بدست آمد. نتایج این مطالعه نشان داد که استفاده از شیوه‌های نوین داده‌کاوی جهت تهیه نقشه بارش و مدل‌سازی و پردازش در محیط برنامه‌نویسی در مناطقی با تعداد معدود ایستگاه‌های باران‌سنجی، تهیه نقشه‌های دقیق بارش و فرساینده‌گی باران را ممکن می‌سازد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۳/۷	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۷/۱	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۷/۴	
تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۹/۱	
واژه‌های کلیدی: متغیرهای کمکی، نقشه بارش، مدل جنگل تصادفی.	

استناد: امینی؛ الهام، ذوالفقاری؛ علی اصغر، کابلی؛ سیدحسن، رحیمی؛ محمد، (۱۴۰۱) برآورد نقشه‌های فرساینده‌گی و بارش در مناطقی با ایستگاه باران‌سنجی محدود (مطالعه موردی: استان سمنان)، *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۲۰۲۲، ۵۳ (۹)، ۲۰۴۴-۲۰۲۷.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.343710.669279>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.



مقدمه

فرسایش آبی یکی از مهم‌ترین تهدیدهای زیست محیطی در سراسر جهان بوده که علاوه بر تخریب خاک، امنیت غذایی و اکوسیستم‌های طبیعی را نیز تهدید می‌کند (Teng *et al.*, 2017). علاوه بر آن فرسایش سبب کاهش کیفیت آب و خاک شده و اثرات منفی زیادی را بر اکوسیستم‌های طبیعی می‌گذارد (Teng *et al.*, 2017; Amundson *et al.*, 2015). بنابراین کمی کردن فرسایش به منظور بررسی و توسعه دقیق روش‌های حفاظتی اهمیت زیادی دارد. از طرف دیگر دانش دقیق درباره میزان فرسایش به سیاست‌مداران و مدیران برای مدیریت بهتر و استفاده از اراضی کمک می‌کند. به همین علت مدل‌های فیزیکی، مفهومی و تجربی فراوانی در دنیا برای برآورد فرسایش توسعه یافته‌اند (Fenzin and Negtar, 2019; Lal, 2001). که در این بین مدل‌های تجربی به علت سادگی و داشتن محاسبات کمتر در بین محققین برای برآورد فرسایش ارجحیت دارند (Ailo *et al.*, 2015). معادله جهانی هدر رفت خاک (USLE¹) یکی از اولین مدل‌های تجربی ارائه شده برای برآورد فرسایش خاک بود که توسط Wischmeier and Smith (1965) در اواسط دهه ۱۹۶۰ توسعه داده شد. در سال‌های بعد ساختار مدل USLE تغییراتی پیدا کرد. Foster *et al.*, (2003) مدل اصلاح شده جهانی خاک (RUSLE²) را ارائه کردند که این مدل به فراوانی در مناطق مختلف دنیا برای برآورد فرسایش مورد استفاده قرار گرفته است.

برهم کنش فاکتورهای مختلفی سبب ایجاد فرسایش خاک می‌شود، بنابراین برای ارزیابی دقیق آن لازم است که اطلاعات درست و دقیقی از هر یک از این فاکتورها در اختیار باشد (Ailo *et al.*, 2015). مدل RUSLE دارای پنج فاکتور موثر بر فرسایش (E) شامل فرساینده‌ی باران³ (R)، توپوگرافی (LS)، خاک (K)، پوشش گیاهی (c) و مدیریت (p) بوده و میزان فرسایش در این مدل از حاصل ضرب این فاکتورها و بر اساس معادله زیر تعیین می‌شود.

$$E = R \times K \times LS \times p \times c \quad \text{رابطه ۱}$$

فرساینده‌ی باران یکی از مهمترین ورودی‌های این مدل بوده که ترکیبی از شدت، مدت و مقدار بارندگی در یک رویداد نشان می‌دهد (Foster *et al.*, 2003)، که تعیین مقدار دقیق آن در برآورد فرسایش خاک اهمیت زیادی دارد. برای محاسبه مستقیم فرساینده‌ی باران وجود داده‌های باران‌نگار که با استفاده از آنها شدت و مدت بارندگی در یک رخداد را تعیین می‌شود، ضروری است. داده‌ها باران‌نگار فقط در برخی از ایستگاه‌های سینوپتیک جمع‌آوری شده و دسترسی به آن‌ها برای بسیاری از محققین مشکل و یا غیرممکن می‌باشد. از طرف دیگر تعداد اندک ایستگاه‌های سینوپتیک که دارای داده‌های باران‌نگار هستند، سبب می‌شود که درون‌یابی فرساینده‌ی باران با استفاده از روش‌های مختلف درون‌یابی یا خطای زیادی همراه بود و در بسیاری از مناطق و حوزه‌های آبخیز غیردقیق و حتی در برخی مواقع غیرممکن می‌باشد. با این وجود مطالعات محدودی در برخی از استان‌های کشور پهنه‌بندی فرساینده‌ی باران با استفاده از روش‌های درون‌یابی از جمله روش‌های زمین‌آمار انجام شده است. به عنوان مثال (salarvand *et al.*, 2019) در استان لرستان، (Zareh *et al.*, 2019) در استان فارس و (Shahosseini *et al.*, 2022) در استان آذربایجان غربی پهنه‌بندی فرساینده‌ی باران را با استفاده از روش‌های مختلف زمین‌آمار از قبیل کریجینگ، کوکریجینگ و روش معکوس فاصله انجام دادند. تعداد اندک ایستگاه در استفاده از روش‌های زمین‌آمار سبب می‌شود که پهنه‌های وسیعی از استان‌های مورد مطالعه، دارای مقادیر مشابه فرساینده‌ی باران بوده، که این نتایج مغایر با تغییر پذیری بالای مکانی فرساینده‌ی باران می‌باشد. با توجه به نتایج بدست آمده به نظر می‌رسد که استفاده از تکنیک‌های نوین در برآورد و پهنه‌بندی فرساینده‌ی باران امری ضروری است. به همین علت محققان به دنبال یافتن ارتباط بین فرساینده‌ی باران و خصوصیات در دسترس‌تر از قبیل بارش ماهانه و سالانه مناطق مورد مطالعه هستند (Weishmeier and Smith, 1980; Arnold, 1980; Panagos *et al.*, 2016). در این روش‌ها می‌توان اطلاعات بارش سالانه و ماهانه منطقه مورد مطالعه را با استفاده از روش‌های درون‌یابی تعیین نمود، سپس با استفاده از نقشه بارش منطقه مقادیر فرساینده‌ی باران برآورد می‌کنند. از طرف دیگر در استفاده از تکنیک‌های درون‌یابی وجود تعداد مناسب ایستگاه باران‌سنجی و نحوه پراکنش ایستگاه‌ها اهمیت زیادی دارد. به طوری که در بسیاری از مناطق کشور به علت فقدان تعداد مناسب ایستگاه تهیه نقشه‌های دقیق بارش نیز امکان‌پذیر نبوده و یا با خطای زیاد بخصوص در مناطق مرتفع کوهستانی، خشک و نیمه خشک همراه است (Ghazanfari *et al.*, 2011). بنابراین بسیاری از روش‌های نوین، در پی برآورد بارش مناطق مورد مطالعه با استفاده از متغیرهای کمکی در دسترس هستند. در سال‌های اخیر محققین برای برآورد مقادیر بارش در مناطق فاقد داده‌های اندازه‌گیری (کمبود باران‌سنج) از متغیرهای حاصل از

1 Universal soil loss equation

2 Revised USLE

3 erosivity

تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های شبکه‌ای کمک گرفته‌اند. داده‌های ماهواره‌ای با داشتن دیدی وسیع و متمرکز با جمع‌آوری، ذخیره و توزیع داده و همچنین داشتن قدرت تفکیک زمانی و مکانی بالا به پایش مناطق فاقد باران سنج کمک می‌کنند. از منابع قابل اعتماد در برآورد بارش، داده‌های تصاویر ماهواره TRMM و داده‌های شبکه‌ای Open Land Map Precipitation (LMP) می‌باشند (Hengl., 2018) که با ابعاد یک تا چندین کیلومتر به خوبی روند تغییرات متغیرهای آب و هوایی را نشان می‌دهد (Cohen Line et al., 2014). محققین مختلفی از این داده‌ها جهت بهبود کیفیت داده‌های بارندگی، ایجاد ارتباط با داده‌های زمینی و تهیه نقشه رقومی بارش استفاده نمودند (Satge et al. 2017; Chen et al., 2012; Kimani et al., 2017). ارتباط قوی با بارش دارد، می‌تواند به فرآیند بازسازی داده‌های باران کمک کند. مساله اساسی در انتخاب ویژگی‌ها این است که باید به راحتی در دسترس باشد و پوشش گسترده داشته باشد (Jing et al., 2017). در پژوهش‌هایی واکنش پوشش گیاهی، ارتفاع، و دمای سطح زمین LST^1 (دمای سطح زمین) به بارش مورد مطالعه قرار گرفته است (Zhang et al., 2005; Zhong et al., 2020). و مشخص شده که خصوصیات مذکور با بارش دارای همبستگی معنی داری هستند (Spracklen et al., 2012, Sokol et al., 2009, Jing et al., 2017).

با توجه به بررسی مطالعات گذشته، و بررسی نقایص مطالعات قبلی در پهنه بندی فرسایندها در برخی از استان‌های کشور، هدف از انجام این پژوهش درگام نخست، تهیه نقشه دقیق بارش استان سمنان با کمک متغیرهای محیطی حاصل از تصاویر ماهواره‌ای و ارتفاع می‌باشد. همچنین محاسبه ضریب فرسایندها باران (EI_{30}) براساس داده‌های ایستگاه سینوپتیک برقراری ارتباط بین فرسایندها بارش سالانه از اهداف دیگر این مطالعه می‌باشد. پهنه‌بندی فرسایندها باران برای منطقه مورد مطالعه هدف نهایی این مطالعه است.

مواد و روش

منطقه مورد مطالعه

استان سمنان با وسعت ۹۶۸۱۶ کیلومتر مربع، ۵/۸ درصد از مساحت کشور را به خود اختصاص داده است. مختصات جغرافیایی استان از $33^{\circ}15'$ تا $37^{\circ}20'$ عرض شمالی و از $51^{\circ}50'$ تا $57^{\circ}03'$ طول شرقی متغیر است (شکل ۱). این استان در دامنه‌های جنوبی رشته کوه‌های البرز و در بخشی از دشت کویر واقع شده است که بیش از نیمی از سطح استان را تشکیل می‌دهد. بدین ترتیب ارتفاع استان از شمال به جنوب کاهش می‌یابد به گونه‌ای که اختلاف ارتفاع تا بیش از ۳۰۰۰ متر قابل مشاهده است. متوسط ارتفاع از سطح دریا در این استان برابر ۱۰۶۷ متر و گستره جغرافیایی آن را می‌توان به سه قسمت کوهستانی، کوهپایه‌ای و نواحی پست دشت کویر تقسیم کرد. حداقل دمای استان ۱۲/۸، حداکثر ۲۳/۷ و متوسط آن ۱۸/۳ درجه است. دارای ۴۴ ایستگاه باران سنج و ۶ ایستگاه سینوپتیک است که به تازگی ۳ ایستگاه دیگر نیز به آن اضافه گردید. متوسط بارندگی سالیانه در استان حدود ۱۳۶ میلی‌متر است.

تهیه نقشه بارندگی استان با استفاده از متغیرهای کمکی و روش داده‌کاوی

برای تهیه نقشه متوسط بارندگی استان بر اساس مفاهیم روش اسکورپین^۲ (McBratney et al., 2020)، متغیرهای محیطی که همبستگی معنی‌داری با بارندگی ایستگاه‌ها دارند انتخاب شدند (Ghobarzgabher et al., 2020)، سپس ارتباط بین این متغیرها با بارش ایستگاه‌ها با استفاده از روش داده‌کاوی جنگل تصادفی مورد ارزیابی قرار گرفت و در نهایت با استفاده از متغیرهای محیطی نقشه بارش استان در نقاط فاقد داده و بر اساس مدل داده‌کاوی ارائه شده، تعیین شد (شکل ۲). متغیرهای محیطی مورد اشاره شامل اطلاعات مربوط به پوشش (شاخص پوشش گیاهی)، دمای سطح زمین، ارتفاع، و داده‌های شبکه‌ای جهانی بارش Open Land Map Precipitation بود که به عنوان متغیرهای کمکی در برآورد بارش استان استفاده شدند و در ادامه تشریح شده‌اند.

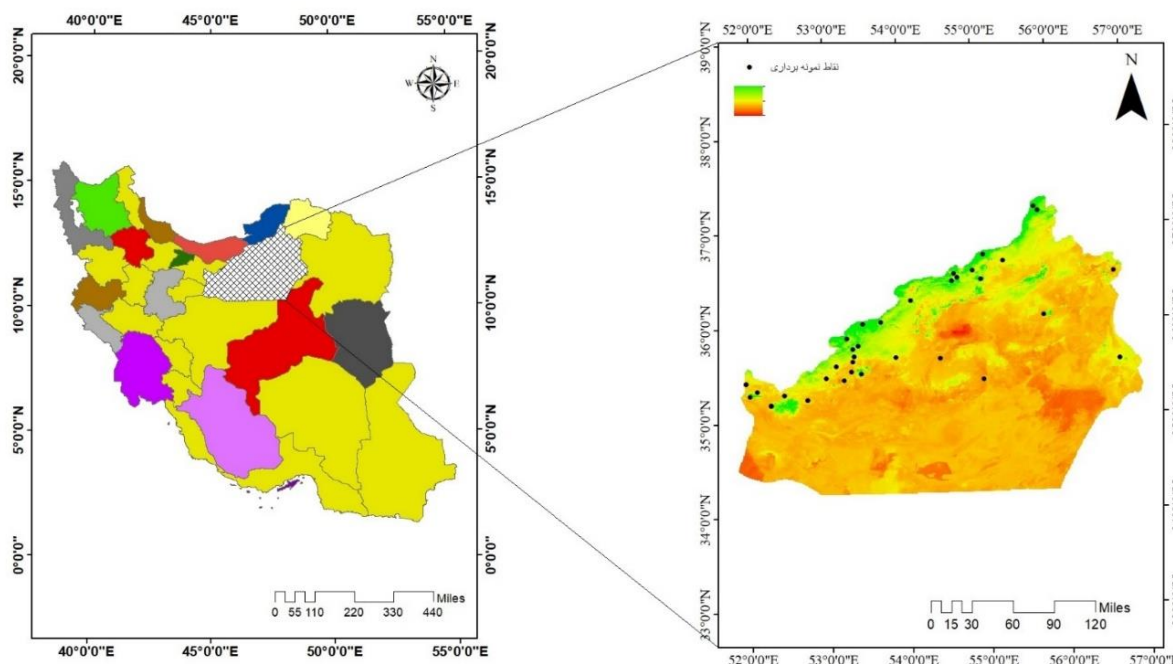
شاخص پوشش گیاهی

تغییرپذیری NDVI به طور مستقیم با تغییرات آب و هوا، به ویژه تغییرات بارندگی در ارتباط است (Richard et al., 1998). بنابراین از شاخص‌های NDVI به عنوان شاخص‌هایی برای نشان دادن پویایی زمانی - مکانی بارندگی استفاده

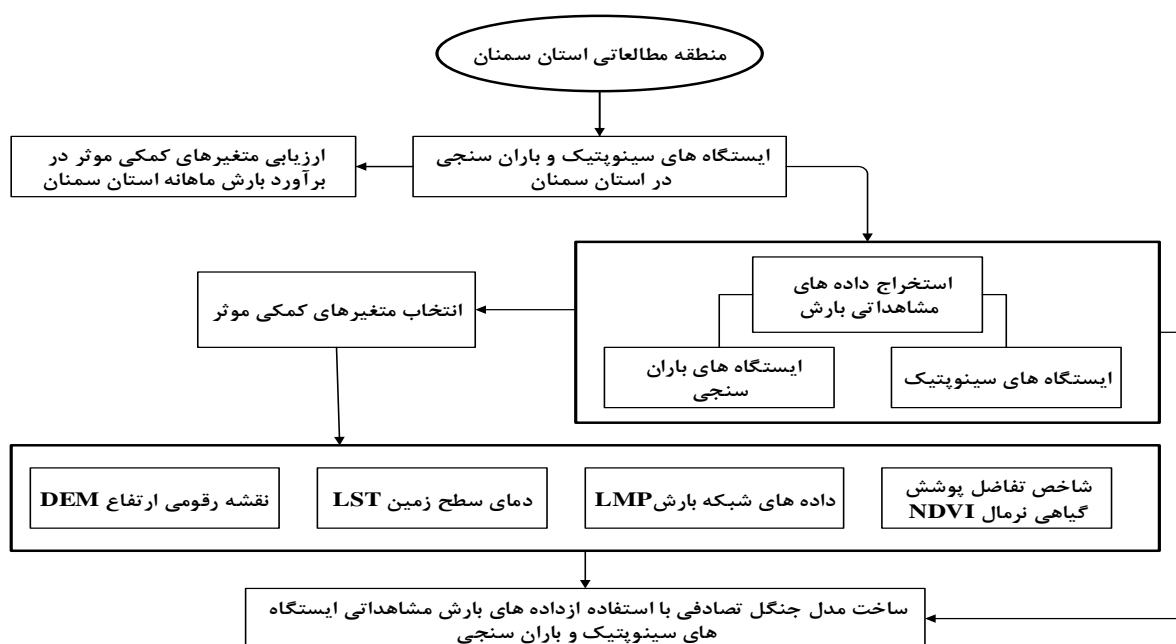
1 Land Surface Temperature

2 scorpion

می‌شود (Zanjani *et al.*, 2019). بنابراین در مطالعه حاضر شاخص NDVI به عنوان متغیر کمکی برای برآورد بارش مورد استفاده قرار گرفت. از آنجایی که تصاویر ماهواره‌ای در هر روز متفاوت بوده، استفاده از یک تصویر برای برقراری ارتباط بین بارش و متغیر کمکی معمولاً سبب خطا در مدل‌سازی می‌شود. از این رو میانه NDVI ماه‌های فروردین، اردیبهشت و خرداد ۱۰ سال اخیر سنجنده مودیس ماهواره تِرا، به عنوان شاخص پوشش گیاهی در نظر گرفته شدند. تصاویر NDVI یکی از محصولات سنجنده مودیس ماهواره تِرا می‌باشد که هر ۱۶ روز یکبار از مناطق مورد مطالعه تهیه شده و دارای قدرت تفکیک مکانی یک کیلومتر هستند. در این پژوهش پردازش و محاسبه میانه تصاویر در محیط گوگل ارث انجین (GEE) که تصاویر NDVI ۱۶ روزه که سری زمانی تصاویر مذکور تحت نام "MODIS/061/MOD13A2" شناخته می‌شوند، انجام و تصاویر نهایی NDVI اخذ شدند.



شکل ۱- موقعیت منطقه در ایران و موقعیت ایستگاه‌های باران سنجی استان سمنان



شکل ۲- فلوجارت روش تهیه نقشه بارش در منطقه مورد مطالعه

دمای سطح زمین

دلیل تاثیر کاهش دما (Ghobarzgabher *et al.*, (2020) از داده‌های دمای سطح زمین (LST) که یکی از پارامترهای کلیدی در فرآیندهای فیزیکی سطح زمین در مقیاس منطقه‌ای و جهانی است و به طور گسترده‌ای در هواشناسی و تعادل انرژی سطح کاربرد دارد نیز به عنوان دیگر متغیر کمکی در برآورد بارش استفاده شده است (Cheng *et al.*, 2010). یکی از محصولات سنجنده مودیس ماهواره ترا دمای روزانه سطح زمین (LST) است که با استفاده از الگوریتم (پنجره مجزا) generalized split-window دمای سطح زمین را محاسبه می‌کند، این محصول دارای قدرت تفکیک مکانی یک کیلومتر بوده و به صورت روزانه از تمام نقاط دنیا داده‌های LST را بر حسب کلونین (K) در اختیار قرار می‌دهد. در این مطالعه متوسط دمای سالانه سطح زمین با میانگین‌گیری از داده‌های روزانه در ۱۰ سال اخیر تعیین و به عنوان یک متغیر کمکی استفاده شد. پردازش و محاسبه میانگین سالانه LST در محیط گوگل ارث انجین (GEE) که سری زمانی تصاویر مذکو تحت نام "MODIS/061/MOD11A1" در سامانه شناخته می‌شوند، انجام شد.

داده‌های شبکه‌ای بارش و داده‌های ارتفاع

داده‌های شبکه‌ای و ماهواره‌ای بارش با داشتن قدرت تفکیک زمانی و مکانی بالا برای مناطق عاری از باران سنج استفاده می‌گردد، اما مقدار مطلق آن‌ها معمولاً بیانگر بارش یک منطقه نبوده و مقادیر بارش حاصل از این گونه داده با خطا همراه است. از این رو جهت افزایش دقت، مقایسه‌ی آن‌ها با داده‌های موجود در ایستگاه‌های زمینی بارش ضرورت دارد. در این مطالعه متناظر با تاریخ اخذ داده‌ها در ایستگاه‌های زمینی از تصاویر بانک داده "Open Land Map Precipitation" (LMP) با اندازه سلول برابر با یک کیلومتر (Hoffman *et al.*, 2007, Hengl, 2018)، استخراج و با داده‌های ایستگاه‌های موجود واسنجی و مقایسه گردیده است. داده‌های شبکه‌ای LMP داده‌های متوسط بارش ماهانه کل دنیا را با تفکیک مکانی یک کیلومتری ارائه می‌کند که برای بدست آمدن داده‌های بارش ماهانه، از داده‌های اقلیمیIMERG, CHLSA و worldclim استفاده شده است. در این مطالعه بارش سالانه منطقه مورد مطالعه با استفاده از بارش ماهانه تعیین شد.

بررسی همبستگی بین بارش و ارتفاع در منطقه مورد مطالعه نشان دهنده ارتباط معنی‌داری بین بارش و ارتفاع ایستگاه‌ها می‌باشد. لذا در این مطالعه از ارتفاع به عنوان یک متغیر کمکی در برآورد بارش استفاده شد. بدین منظور از نقشه DEM حاصل از داده‌های SRTM^۱ با قدرت تفکیک ۹۰ متر استفاده شد. برای تعیین ارتفاع ایستگاه‌ها (نقاط دارای داده اندازه‌گیری) و نقاط فاقد داده‌های اندازه‌گیری بارش و برای یکسان کردن قدرت تفکیک مکانی متغیرهای کمکی مورد استفاده، مدل رقومی ارتفاع با اندازه سلول برابر با ۹۰ متر با استفاده از روش resampling به نقشه‌ی با قدرت تفکیک یک کیلومتر تغییر یافت و از نقشه مذکور به عنوان نقشه رقومی ارتفاع منطقه و به عنوان یکی از متغیرهای کمکی، استفاده شد.

مدل داده‌کاوی برآورد بارش

الگوریتم جنگل تصادفی^۲ (RF) (Cheng *et al.*, (2010) برای مدل‌سازی و برآورد بارش استفاده شد. ارتباط بین متغیرهای کمکی و بارش با استفاده از مدل RF بدست آمد و سپس در مناطق فاقد داده بارش (اما دارای متغیرهای کمکی) مدل گسترش داده شده در فاز قبلی، استفاده و نقشه بارش تهیه شد. مدل RF در محیط برنامه نویسی R و با استفاده از بسته caret اجرا شد. الگوریتم RF برای برقراری روابط پیچیده بین بارش و متغیرهای کمکی که رابطه غیرخطی با متغیر هدف (بارش) دارند، مناسب می‌باشد. در این مدل طبقه‌بندی و رگرسیون مانند درخت ایجاد می‌شود پنج فاکتور شامل، تعداد متغیرهای مورد استفاده برای رشد هر درخت (mtry)، تعداد درختانی که باید در جنگل کشت شوند (ntree)، حداقل تعداد گره‌های انتهایی (nodesize) و نسبت نمونه‌های گرفته شده در یک درخت منفرد از پارامترهای مهم موجود هستند و همه درختان بدون هرس در حداکثر اندازه رشد می‌کنند. هر درخت براساس زیر مجموعه تصادفی داده‌های نمونه (با جایگزینی) آموزش داده می‌شوند. یک زیر مجموعه تصادفی متغیرها نیز برای آموزش درخت انتخاب می‌شود. مقادیر پیش فرض پارامترها، مقادیر تجربی هستند که بر اساس تعدادی آزمایش داده با مجموعه داده‌های مختلف هنگام توسعه مدل انتخاب می‌شوند (Liao *et al.* 2002).

1 Shuttle Radar Topography Mission

2 Random Forest

انتخاب ایستگاه‌ها و جمع‌آوری آمار بارندگی

با توجه اینکه تعداد ایستگاه‌های باران‌نگار جهت پهنه‌بندی فرساینده‌ی در استان با محدودیت روبرو بوده، از این‌رو ابتدا نقشه بارش کل استان تهیه شد. به منظور برقراری ارتباط بین متغیرهای کمکی و بارش و برآورد مدل مناسب برای منطقه، لازم بود بارش ایستگاه‌های باران‌سنجی و سینوپتیک دریافت و سپس ارتباط بین آن و متغیرهای کمکی بدست آید. در پژوهش حاضر، از آمار ۵۰ ایستگاه باران‌سنجی طی دوره ۲۰ ساله استفاده شد. اطلاعات باران‌نگار ایستگاه سینوپتیک دارای باران‌نگار در شهرهای سمنان، دامغان، گرمسار، مهدی‌شهر، میامی، شاهرود، ایوانکی و شه‌میرزاد از سازمان هواشناسی اخذ و شاخص فرساینده‌ی باران با استفاده از روش ارایه شده در قسمت بعد محاسبه شد. مناطق شمالی استان که دارای بیشترین بارندگی بودند، فاقد ایستگاه‌های سینوپتیک برای محاسبه شاخص فرساینده‌ی باران هستند. به همین علت از ایستگاه‌های سینوپتیک استان هم‌جوار که دارای بارندگی مشابه مناطق شمالی استان می‌باشد شامل ایستگاه‌های سینوپتیک کیاسر، پل سفید و آلاشت نیز برای محاسبه فرساینده‌ی باران استفاده شد.

محاسبه شاخص فرساینده‌ی باران (EI₃₀) R

لازمه محاسبه شاخص فرساینده‌ی باران وجود داده‌های باران‌نگار است. بدین منظور گراف‌های بارندگی به صورت اسکن شده وارد نرم‌افزار Weather Graph Analysis System (سامانه بازیافت داده از گراف‌های هواشناسی) شده و داده‌های بارندگی با پایه زمانی ۱۰ دقیقه، به صورت فایل اکسل استخراج گردید. بدین ترتیب شدت بارندگی با تداوم ۱۰ دقیقه، با تقسیم مقدار بارندگی بر زمان بارش محاسبه شد. سپس برای محاسبه شاخص فرساینده‌ی یک رگبار، پس از تبدیل زمان بارش به بازه‌های ۱۰ دقیقه‌ای، ابتدا مقدار انرژی جنبشی واحد برای هر دوره Eu (MJha⁻¹mm⁻¹) با توجه به شدت آن دوره I (mm h⁻¹) با استفاده از رابطه زیر محاسبه گردید (Nearing et al., 2017).

$$E_u = 0.119 + 0.0873 \log_{10}(I) \quad \text{رابطه (۲)}$$

با جمع کل انرژی جنبشی تمام دوره‌ها، انرژی جنبشی آن رگبار (MJha⁻¹) به دست آمد. سپس از حاصل ضرب حداکثر شدت ۳۰ دقیقه‌ای (mmh⁻¹) یک رخداد (I₃₀) در انرژی جنبشی کل آن، مقدار شاخص فرساینده‌ی (EI₃₀) (MJha⁻¹mm h⁻¹) برای هر رگبار با استفاده از رابطه (۳) محاسبه گردید.

$$R = E_u \times I_{30} \quad \text{رابطه (۳)}$$

در ادامه شاخص فرساینده‌ی (EI₃₀) سالانه (MJha⁻¹mm h⁻¹year⁻¹) برای هر ایستگاه در هر سال از حاصل جمع EI₃₀ مربوط به رخدادهای یک سال آن ایستگاه به دست آمد.

استخراج شاخص فرساینده‌ی باران مبتنی بر انرژی جنبشی و شدت بارندگی معمولاً مشکل و زمان‌بر بوده و از طرف دیگر محاسبه این شاخص فقط در ایستگاه‌های سینوپتیک دارای داده‌های باران‌نگار، امکان‌پذیر است. به همین علت محققان سعی دارند از شاخص‌های ساده‌تری مانند مقدار بارندگی و برقراری ارتباط رگرسیونی بین شاخص EI₃₀ و بارش برای ایستگاه‌های فاقد باران‌نگار استفاده کنند. در این مطالعه در ابتدا شاخص فرساینده‌ی داران باران‌نگار با استفاده از بسته Rainfall Erosivity Factor در محیط برنامه نویسی R تعیین و سپس رابطه رگرسیونی غیر خطی بین بارش متوسط سالانه ایستگاه سینوپتیک و شاخص فرساینده‌ی باران بدست آمد.

ارزیابی مدل

برای ارزیابی عملکرد روش RF در برآورد بارش، از دو آماره ضریب تبیین^۱ (R²) و ریشه میانگین مربعات خطا^۲ (RMSE) استفاده گردید. در آماره اول مقادیر نزدیک به یک بیانگر شرایط خوب مدل رگرسیونی است و بر اساس آماره RMSE مدلی مناسب است که مقدار آن به صفر میل نماید. روابط ریاضی این دو به شکل زیر است:

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}) (P_i - \bar{P})]^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2} \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad \text{رابطه (۵)}$$

O_i و P_i به ترتیب مقادیر مشاهداتی و برآورد شده بارش و n تعداد داده‌ها اندازه‌گیری شده می‌باشد.

1 Coefficient of determination

2 Root Mean Square Error (RMSE)

نتایج و بحث

خلاصه آماری متغیرهای کمکی مورد استفاده

در این پژوهش جهت دستیابی به نقشه دقیق بارش، تعدادی از متغیرهای موثر (DEM, LST, NDVI) در ایجاد بارش و داده‌های بارش شبکه ای LMP در نظر گرفته شد و ارتباط این عوامل با بارش ایستگاه‌های زمینی مدل‌سازی گردید. ویژگی‌های آماری متغیرهای کمکی مورد استفاده در جدول (۱) نشان داده شده است. مقدار بارش داده‌های شبکه‌ای LMP بین ۷۷/۳۵ تا ۵۴۴ میلی‌متر، مقدار NDVI در مناطق بدون پوشش تا مناطق با پوشش متراکم بین ۰/۰۰۲ تا ۰/۸۵، مقادیر LST بین ۲۹۳/۶۷ تا ۳۲۸/۸۱ کلین و DEM بین ۷۰۰ تا ۳۸۹۰ متر متغیر بود. همچنین ضریب تغییرات داده‌های LMP, NDVI, LST, DEM به ترتیب برابر با ۴۱، ۶۲، ۱/۵ و ۴۱ درصد بدست آمد. همان‌طور که نتایج ضریب تغییرات (CV) نیز نشان می‌دهد در بین متغیرهای مورد مطالعه کمترین درصد ضریب تغییرات (CV) مربوط به متغیر LST و بیشترین آن مربوط به متغیر NDVI می‌باشد. ضریب تغییرات نشان‌دهنده دامنه تغییرپذیری یک متغیر بوده که هر چه مقدار این ضریب کمتر باشد نشان‌دهنده پراکنش یکنواخت‌تر ویژگی مورد مطالعه می‌باشد. با توجه به کلاس تغییرپذیری ضریب تغییرات بر اساس معیار ارائه‌شده توسط ویلدینگ (Wilding, 1985) اگر درصد ضریب تغییرات کمتر از ۱۵ باشد، تغییرپذیری کم، اگر این ضریب بین ۱۵ تا ۳۵ درصد باشد، تغییرپذیری متوسط و اگر ضریب تغییرات بیشتر از ۳۵٪ باشد، تغییرپذیری ویژگی زیاد است. بر همین اساس متغیر LSD دارای تغییرپذیری کم و تمامی دیگر متغیرهای کمکی مورد استفاده در کلاس با تغییرپذیری زیادی بودند. این نتایج نشان دهنده تنوع بسیار زیاد در پوشش گیاهی، بارش و ارتفاع در استان بود. مناطق جنوبی استان دارای اراضی مسطح و با شیب کم بوده که به کویر مرکزی ایران مرتبط می‌شوند، این مناطق دارای پوشش گیاهی اندک بوده و مقدار بارش در این مناطق کمتر از ۱۰۰ میلی‌متر می‌باشد.

جدول ۱- آماره‌های توصیفی متغیرهای کمکی حاصل از دریافت تصاویر ماهواره‌ای

متغیرها	کمینه	بیشینه	میانگین	انحراف معیار	ضریب تغییرات (CV)
Rain LMP (mm)	۷۷/۳۵	۵۴۴	۱۳۵/۰۳	۵۶/۲۸	٪۴۱
NDVI	۰/۰۰۲	۰/۸۵	۰/۰۸۶	۰/۰۵	٪۶۲
LST (K)	۲۹۳/۶۷	۳۲۸/۸۱	۳۲۰/۴۴	۵/۱۴	٪۱/۵
DEM (m)	۷۰۰	۳۸۹۰	۱۰۶۷/۶۳	۴۴۰/۳۷	٪۴۱

بررسی همبستگی بین بارش ایستگاه‌ها و متغیرهای کمکی

به منظور شناسایی وجود و روند ارتباط بین بارش با متغیرهای کمکی از ضریب همبستگی استفاده شد. با توجه به نتایج بدست آمده همبستگی منفی معنی‌داری بین دمای سطح زمین (LST) با داده‌های بارش مشاهده گردید ($r = -0/81^{**}$) (جدول ۲). که نشان‌دهنده افزایش بارش در اثر کاهش دما در استان می‌باشد، به عبارت دیگر مناطق با دمای پایین‌تر دارای بارندگی بیشتری هستند. البته کاهش دما در استان معمولاً با افزایش ارتفاع همراه می‌باشد بنابراین می‌توان انتظار داشت که با افزایش ارتفاع، دما کاهش و بارندگی افزایش پیدا می‌کند (Zanjani et al., 2019). (Kavoi et al., 2013) در غرب آفریقا ارتباط معنی‌دار منفی بین دمای سطح زمین و بارندگی گزارش نمودند که بسته به نوع پوشش زمین متفاوت بوده است. این ارتباط در اراضی جنگلی ضعیف و در خاک‌های فاقد پوشش، بالاتر بوده است. داده‌های شبکه‌ای بارش LMP بیشترین همبستگی را با بارش ایستگاه‌ها داشتند، به طوری که همبستگی بین داده‌های LMP و بارش ایستگاه‌های زمینی، مثبت و برابر با ۰/۸۵ ($r = 0/85^{**}$) بدست آمد (جدول ۲)، که نشان‌دهنده قابلیت بالای این داده‌های در برآورد بارش مناطق فاقد ایستگاه‌های بارسنجی است. البته این نتایج نشان داد که استفاده از مقادیر واقعی داده‌های شبکه‌ای بارش ممکن است سبب ایجاد خطای ۱۵ درصدی در برآورد بارش مناطق فاقد داده شود و نیاز است این که این داده‌ها با استفاده از داده‌های زمینی واسنجی شوند. با توجه به همبستگی مثبت بین متغیر NDVI و داده‌ی بارش ایستگاه‌های زمین ($r = 0/76^{**}$) (جدول ۲) می‌توان پی برد. تاثیر بارندگی بر رشد پوشش گیاهان قابل ملاحظه بوده است. (Zanjani et al., 2019) رابطه‌ی بین شاخص NDVI و پارامترهای بارندگی را معنی‌دار گزارش نمودند (Chou et al., 2013) نیز رابطه معنی‌داری ($r = 0/75^{**}$) بین میانگین NDVI و بارش ماهانه بدست آوردند. نقشه رقومی ارتفاعی (DEM) با بارندگی ارتباط مثبت و معنی‌داری ($r = 0/76^{**}$) را نشان داد که می‌توان آن را ناشی از تاثیرات ارتفاعات بر بارندگی دانست. مناطق کوهستانی شمال استان دارای بیشترین ارتفاع و بیشترین بارش هستند، در حالی که اراضی جنوبی استان که ارتفاع کمتری دارند دارای بارش کمتری نیز می‌باشند. در مطالعه‌ی (Hakim Khani et al., 2010); (Niknami et al., 2014); (Kavian et al., 2015)

این هم‌خوانی تغییرات بارندگی با ارتفاع مشاهده شد. با توجه به همبستگی بالای بین داده‌ی زمینی و متغیرهای کمکی، می‌توان انتظار داشت که متغیرهای محیطی مورد استفاده تاثیر قابل ملاحظه‌ای در بهبود نتایج مدل‌سازی خواهند داشت، بنابراین می‌توان از متغیرهای محیطی در برآورد بارندگی مناطق فاقد آمار استفاده نمود.

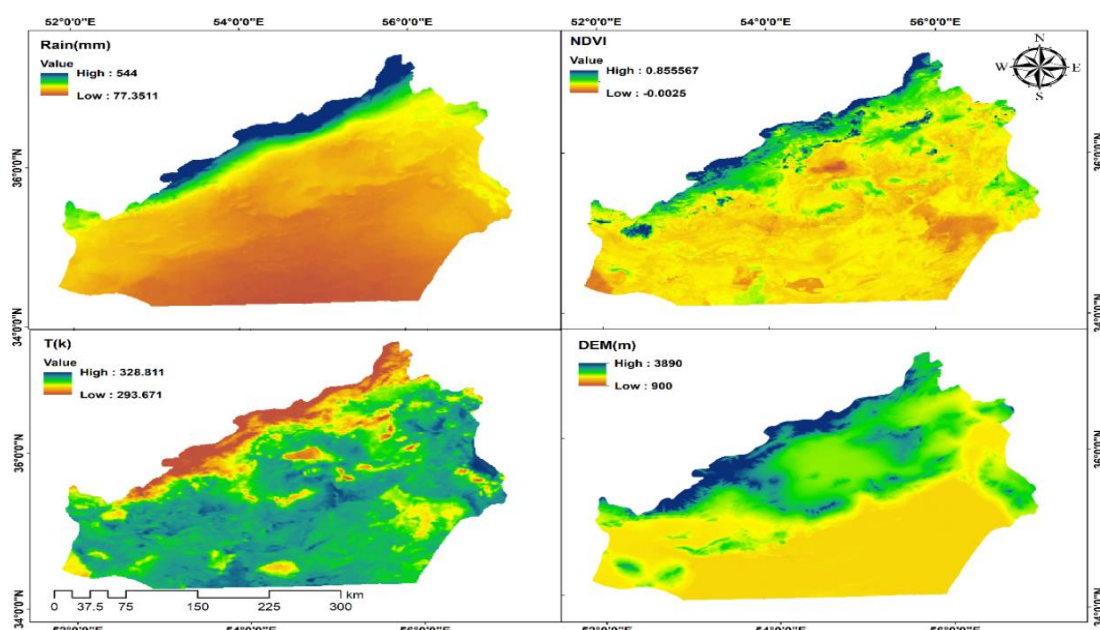
جدول ۲- ماتریس همبستگی بین بارش ایستگاه‌ها و متغیرهای کمکی

بارش ایستگاه‌ها	بارش (LMP)	DEM	NDVI	LST	
-۰/۸۱**	-۰/۸۶**	-۰/۸۵**	-۰/۷۳**	۱	LST
۰/۷۶**	۰/۷۳**	۰/۴۵*	۱	-۰/۷۳**	NDVI
-۰/۷۶**	۰/۷۲**	۱	۰/۴۵*	-۰/۸۶**	DEM
۰/۸۵**	۱	۰/۷۲**	-۰/۷۳**	-۰/۸۶**	بارش (LMP)
۱	۰/۸۵**	۰/۷۶**	-۰/۷۶**	-۰/۸۱**	بارش ایستگاه‌ها

** و * به ترتیب نشان‌دهنده معنی‌داری در سطح ۱ و ۵ درصد می‌باشند.

توزیع مکانی متغیرها و برآورد نقشه بارش استان

شکل (۳) الگوی توزیع مکانی متغیرهای کمکی شامل LMP، NDVI، LST و DEM را نشان داده است. الگوی توزیع مکانی ارتفاعات منطقه نشان‌دهنده حداکثر ارتفاع در شمال منطقه است که به طرف جنوب به تدریج از ارتفاع کاسته می‌شود و کمترین ارتفاع در جنوب استان قابل مشاهده است. همان‌گونه که از شکل الگوی پراکنش پوشش گیاهی مشخص است، بیشترین میزان پوشش گیاهی نیز منطبق بر شمال حوزه است که می‌توان آن را مربوط به پوشش متراکم منطقه که قسمت‌هایی از جنگل‌های هیرکانی است، دانست و در جنوب که زمین فاقد پوشش است، کمترین میزان NDVI مشاهده شد که این نتایج با توجه به شرایط منطقه قابل انتظار بود. قسمت مرکزی استان منطبق بر مراتع فقیر و اراضی فاقد پوشش گیاهی و بایر است، که اطلاعات ایستگاه‌های باران‌سنجی در این مناطق نشان‌دهنده بارش کمتر از ۱۰۰ میلی‌متر در مناطق مذکور می‌باشد. (Sharma et al. (2021 در بررسی حساسیت NDVI به بارش به این نتیجه رسیدند که همبستگی NDVI-بارش به پوشش زمین (علفزار، زمین‌های زراعی، جنگل‌ها و مناطق شهری)، شرایط آب و هوایی (دما، بارندگی، رطوبت و خاک) و ارتفاع منطقه بستگی دارد. این همبستگی در مطالعه‌ی Wang et al. (2013) بسته به شرایط آب و هوایی در فصول مختلف متفاوت بوده است.

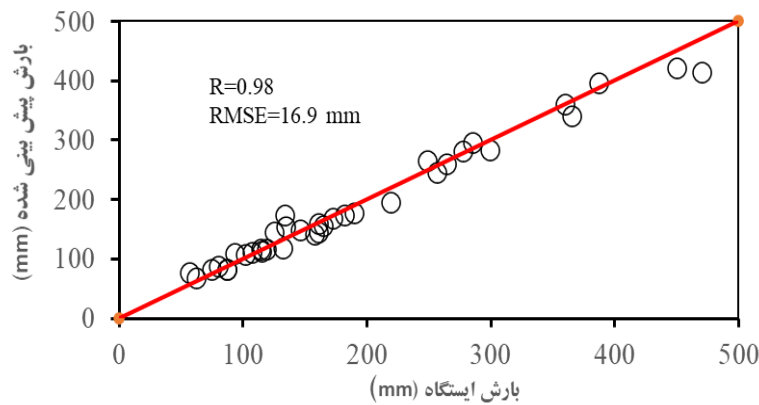


شکل ۳- الگوی توزیع مکانی داده‌های شبکه‌ای بارش (LMP)، NDVI، LST و DEM در منطقه مورد مطالعه

ارزیابی مدل RF در برآورد بارش استان و تهیه نقشه بارش در استان

شکل (۴) داده‌های اندازه‌گیری شده و برآورد شد بارش با استفاده از متغیرهای کمکی را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود،

داده‌ها بارش سالانه در تمامی دامنه داده به خط "یک به یک" نزدیک هستند و ضریب همبستگی بین مقادیر برآورد شده و اندازه‌گیری شده بارش معنی‌دار و عدد نزدیک به یک بدست آمد ($r=0.98^{**}$). همچنین مقدار آماره مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) برابر با ۱۶/۹ میلیمتر است یعنی به طور متوسط ۱۶/۹ میلیمتر خطا در برآورد بارش ایستگاه‌های منطقه مورد مطالعه با استفاده از مدل RF وجود داشت. این نتایج نشان می‌دهد که متغیرهای کمکی مورد استفاده در صورت استفاده در یک مدل غیر خطی مانند مدل RF به خوبی قادر به برآورد خصوصیات با پیچیدگی و تغییر پذیری مکانی بالایی مانند بارش می‌باشند. استفاده از مدل‌های غیر خطی مانند مدل RF در برآورد مکانی خصوصیات خاک به وفور استفاده شده است (Cheshmberah *et al.*, 2022, Khosravi *et al.*, 2022) اما بر اساس اطلاعات نویسندگان استفاده از روش مذکور در بررسی و برآورد مکانی بارش برای اولین بار استفاده شده است. البته استفاده از روش‌ها درونیایی مانند تکنیک‌های مختلف زمین آمار در برآورد بارش سالانه و ماهانه به وفور مورد استفاده قرار گرفته است. به عنوان مثال Yosefikebriya *et al.*, (2020) تلاش کردند که با استفاده از متغیر کمکی ارتفاع و روش درون‌یابی کوکریجینگ دقت برآورد مکانی بارش در استان مازندران را افزایش دادند.

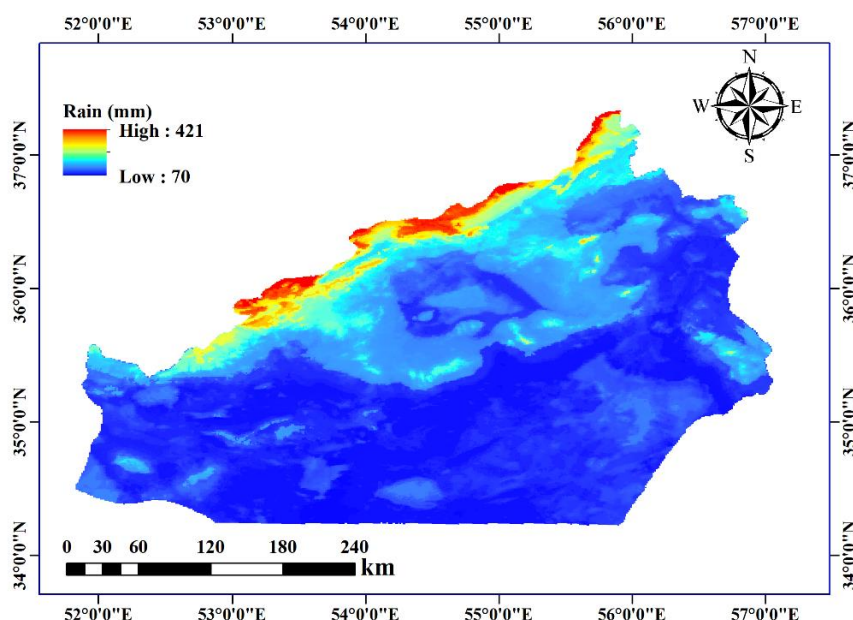


شکل ۴- ارتباط بین بارش واقعی و بارش حاصل از مدل RF در ۵۰ ایستگاه مورد بررسی

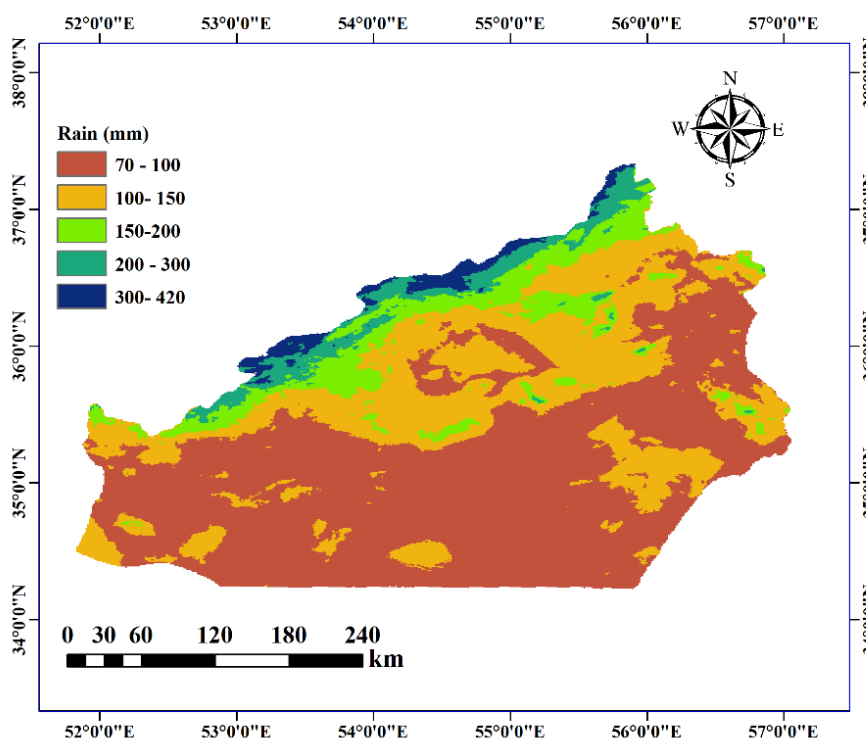
پس از بررسی میزان همبستگی بین متغیرها کمکی و بارندگی ایستگاه‌های زمینی، و ساخت مدل برای برآورد بارش در مناطق فاقد داده اندازه‌گیری، برآورد بارش انجام و نقشه مکانی بارش استان با قدرت تفکیک یک کیلومتر تهیه شد (شکل ۵). حداکثر بارندگی استان بر اساس نقشه بارش برآورد شده ۴۲۰ میلیمتر و حداقل آن حدود ۷۰ میلیمتر برآورد شد. درحالی‌که داده‌های شبکه‌ای بارش (MLP)، میزان بارش استان را بین ۷۷ تا ۵۴۴ میلیمتر برآورد کرده بودند. نتایج تغییرات مکانی نقشه تولید شده، تفاوت ۱۰ الی ۲۸ درصدی در بارش مناطق مختلف استان را با داده‌های شبکه‌ای نشان می‌دهد. این نتایج همچنین نشان می‌دهد که داده‌های شبکه‌ای MLP، بارش مناطق شمالی استان را که دارای بارش بیشتری هستند را با خطای بیشتری برآورد کرده و مقادیر بارش در این نواحی را بیش از مقدار واقعی برآورد می‌کنند. همچنین داده‌های شبکه‌ای بارش در پیش‌بینی بارش اراضی مسطح پایین دست استان نیز، مناطق زیادی را هم‌بارش در نظر گرفته‌اند، درحالی‌که وجود مناطق کوهستانی در برخی از مناطق جنوب و شرق استان، بارش متفاوتی نسبت به اراضی مسطح جنوب استان دارند، که در نقشه تولید شده با استفاده از متغیرهای کمکی بارش این مناطق به درستی از مناطق مسطح جنوب استان بارش متفاوتی را نشان می‌دهند. قسمت‌های شمالی استان که به جنگل‌های هیرکانی شمال کشور نزدیک‌تر است؛ میزان بارندگی زیاد و در قسمت‌های میانی استان به طرف شمال، متوسطی از بارندگی مشاهده شد که مربوط به ارتفاعات متوسط منطقه بود و در بیشتر مناطق شرقی و جنوبی حوزه که منطبق بر مناطق کم‌ارتفاع و کویری استان بود، حداقل مقدار بارش مشاهده شد.

نتایج فراوانی بارش استان و نقشه طبقه‌بندی بارش (شکل ۶) نشان داد که حدود نیمی از مناطق استان دارای بارش کمتر از ۱۰۰ میلیمتر می‌باشد، ۳۰ درصد مناطق بارشی بین ۱۰۰ تا ۱۵۰ میلیمتری دارند و تنها حدود ۱۷ درصد از مناطق استان بارشی بیش از ۱۵۰ میلیمتر را دارا هستند. به طوری که متوسط وزنی بارش در استان ۱۲۰ میلیمتر در سال بدست آمد. نتایج این پژوهش کمک زیادی در مدیریت بهتر سرزمین می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که استقرار پوشش در حدود ۸۰ درصد مناطق استان به علت کمبود رطوبت با دشواری‌های زیادی همراه است و حفظ آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. ارتباط بین مقدار تولید مرتع و بارش توسط محققین مختلفی مورد ارزیابی قرار گرفته است، به عنوان مثال Akbarzadeh *et al.*, (2007) نشان دادند که کاهش بارش تاج پوشش مراتع را تا دو برابر تغییر می‌دهد.

در مطالعه‌ی که توسط Zarekia *et al.*, (2012) انجام شد رابطه معنی داری بین پوشش گیاهی و تولید مرتع مشاهده شد. بارش کمتر از ۱۰۰ میلیمتری در مناطق جنوبی استان سبب می‌شود که این مناطق بسیار مستعد برای فرسایش بادی بوده و بسیاری از این مناطق می‌توانند به عنوان کانون‌های در تولید گرد و غبار در شهرهای استان و مناطق همجوار اثرگذار باشند.



شکل ۵- نقشه بارش تهیه شده استان سمنان با استفاده از متغیرهای کمی و مدل RF

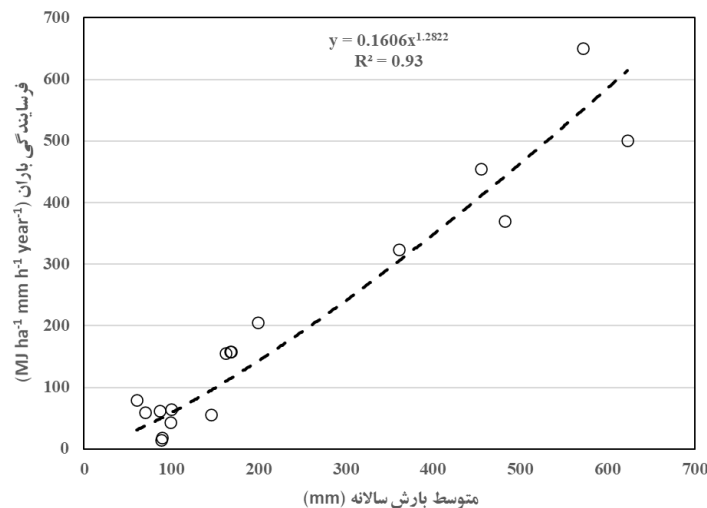


شکل ۶- نقشه بارش طبقه بندی شده استان سمنان با استفاده از داده‌های حاصل از مدل RF

شاخص فرساینده‌ی باران و پهنه‌بندی آن

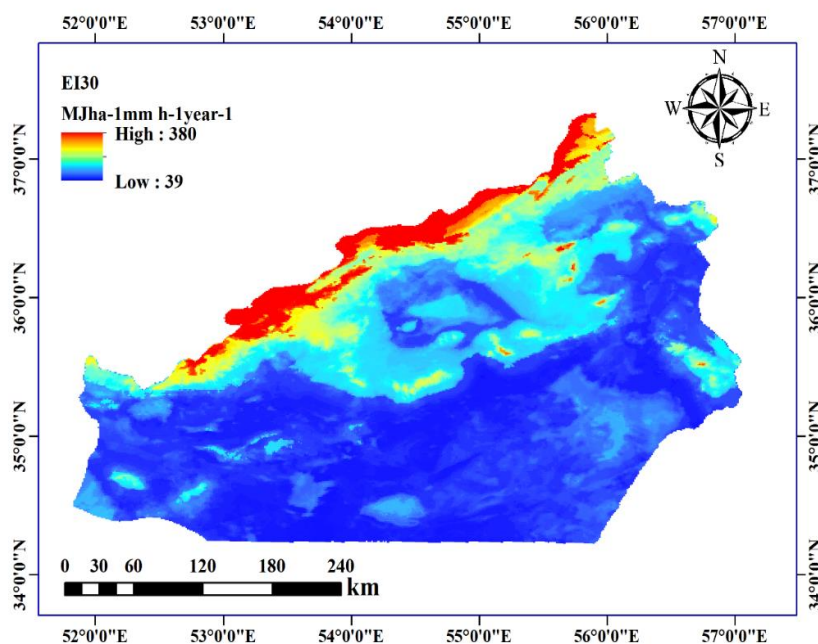
جهت پهنه‌بندی شاخص فرساینده‌ی باران (R) ابتدا با استفاده از اطلاعات ایستگاه‌های سینوپتیک دارای باران‌نگاری، شاخص فرساینده‌ی سالانه محاسبه شد سپس با استفاده از آنالیز رگرسیونی رابطه بین شاخص فرساینده‌ی و مقدار بارش سالانه تعیین شد. نتایج نشان داد که

مقدار فرساینده‌گی باران در ایستگاه‌های سینوپتیک بین ۳۹ تا ۶۲۰ ($\text{MJha}^{-1}\text{mm h}^{-1}\text{year}^{-1}$) متغیر بود. بیشترین فرساینده‌گی در ایستگاه‌های شمالی و کمترین مقدار آن در ایستگاه‌های جنوبی و شرقی استان مشاهده شد. پس از محاسبه مقادیر فرساینده‌گی، ارتباط این متغیر با متوسط بارش سالانه در ایستگاه‌های مورد مطالعه بدست آمد. نتایج آنالیز رگرسیونی نشان داد که تابع توانی بالاترین مقدار ضریب تبیین ($R^2=0/93^{***}$) بین فرساینده‌گی باران و متوسط بارش سالانه را نشان می‌دهد (شکل ۷). بر اساس معادله بدست آمده در صورت در اختیار بودن متوسط بارش می‌توان شاخص فرساینده‌گی را در تمامی مناطق مورد مطالعه تعیین کرد. مطالعات گذشته در دنیا و کشور رابطه بین فرساینده‌گی باران و متوسط بارش سالانه را بررسی نمودند. Lee *et al.* (2014) در جنوب تایوان سه مدل رگرسیون بر اساس متغیرهای بارندگی روزانه، ماهانه و سالانه را برای برآورد فرساینده‌گی باران بدست آوردند این محققین بیان کردند که ارتباط بهتری بین بارش ماهانه و سالانه نسبت به روزانه با و فرساینده‌گی وجود دارد. همچنین Rothbuka *et al.* (2020) با کالیبراسیون فرساینده‌گی باران نشان دادند که ارتباط قوی بین بارش سالانه و فرساینده‌گی باران وجود دارد. در ایران نیز در کرمان و تعداد محدودی از ایستگاه‌های گرگان، خوزستان و فارس روابط رگرسیونی بین شاخص فرساینده‌گی باران و بارش سالانه به دست آمد (Sharifian, 2007; Moradi *et al.*, 2007; Kavian *et al.*, 2016). اخیراً Shahhosein *et al.*, (2022) نقشه فرساینده‌گی باران را برای استان آذربایجان غربی با استفاده از روش‌های درون‌یابی برآورد کردند، این محققین همبستگی بالایی بین بارش سالانه و مقدار فرساینده‌گی باران گزارش کردند.



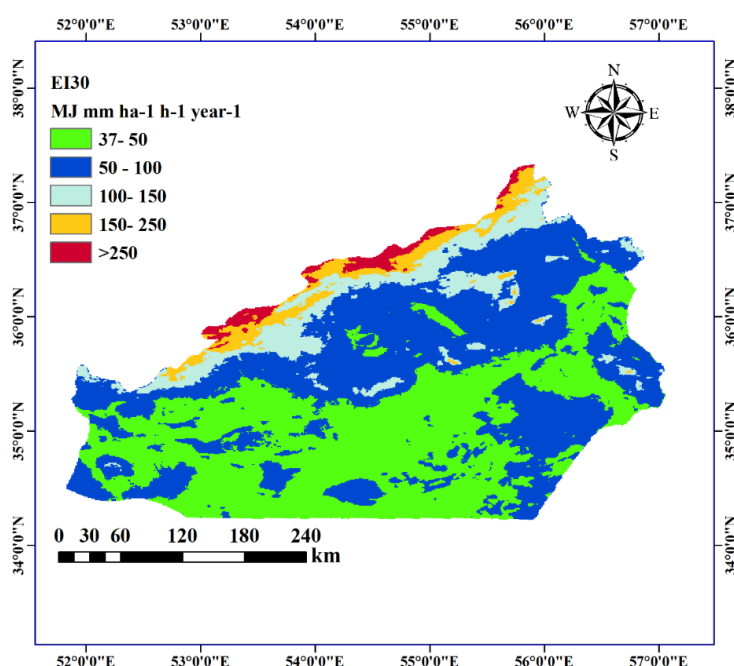
شکل ۷- ارتباط بین فرساینده‌گی باران (R) و متوسط بارش سالانه در ۱۱ ایستگاه دارای اطلاعات باران‌نگار

با استفاده از رابطه بدست آمده بین فرساینده‌گی و متوسط بارش سالانه، و بر اساس نقشه بارش استان (شکل ۴) متوسط فرساینده‌گی سالانه استان تعیین شد (شکل ۸). بیشترین و کمترین مقادیر فرساینده‌گی باران در استان به ترتیب برابر با ۳۸۰ و ۳۹ $\text{MJha}^{-1}\text{mm h}^{-1}\text{year}^{-1}$ در مناطق شمالی و جنوبی استان بدست آمد. بیشترین مقدار R در مناطق کوهستان‌های مرتفع و پرشیب بدست آمد که بر اساس الگوی پراکنش بارش، حداکثر میزان بارندگی استان را داشتند. میزان بالای فرساینده‌گی باران در این مناطق و بالا بودن شیب این مناطق سبب می‌شود که این مناطق را مستعد فرسایش کنند. کمترین مقدار فرساینده‌گی باران در قسمت‌های شرقی و جنوبی استان مشاهده شد که مرتبط با ارتفاع پایین و بارندگی اندک در این مناطق که به قسمت‌های کویری ایران متصل می‌شوند، بوده است. این نتیجه با ارائه نتایج مطالعه Kavian *et al.* (2016) در استان کرمان نیز هم‌خوانی دارد که نشان دادند در ارتفاعات استان کرمان بیشترین فرساینده‌گی باران و در نواحی پست استان کمترین مقدار وجود داشته است. همچنین در مطالعه‌ی که توسط Shahhosein *et al.*, (2022) نیز بیشترین مقدار فرساینده‌گی را در ارتفاعات استان آذربایجان غربی مشاهده کردند.



شکل ۸- نقشه فرساینده‌گی استان سمنان بر اساس معادله شکل (۷)

تحلیل فراوانی نقشه فرساینده‌گی باران و کلاس بندی (شکل ۹) نشان داد که ۴۱/۵ درصد از مناطق استان دارای فرساینده‌گی بین ۳۵-۵۰، ۴۲/۸ درصد استان دارای فرساینده‌گی بین ۵۰-۱۰۰، ۹/۲ درصد مناطق دارای فرساینده‌گی ۱۵۰-۱۰۰، ۴/۲ درصد استان دارای فرساینده‌گی بین ۱۵۰-۲۵۰ و حدود ۲ درصد مناطق استان دارای فرساینده‌گی بیش از ۲۵۰ $\text{MJha}^{-1}\text{mmh}^{-1}\text{year}^{-1}$ را دارند. همچنین بر اساس داده‌های شکل‌های (۸) و (۹) متوسط وزنی فرساینده‌گی باران در استان $۷۵/۱۴ \text{ MJha}^{-1}\text{mm h}^{-1}\text{year}^{-1}$ برآورد شد. نتایج نشان داد که بیشتر مناطق استان دارای فرساینده‌گی پایینی ($R < 100$) هستند. بنابراین به نظر می‌رسد که از نظر فرساینده‌گی، خطر فرسایش آبی در بسیاری از مناطق استان اندک باشد. اما نقشه پوشش گیاهی نشان می‌دهد که نبود پوشش گیاهی مناسب و گچی بودن بسیاری از خاک‌های استان عاملی است که با وقوع اندک بارانی، رواناب شدیدی ایجاد و حجم زیادی از رسوبات با رواناب منتقل شود.



شکل ۹- طبقه بندی فرساینده‌گی باران در استان سمنان بر اساس معادله شکل (۷)

مقایسه نتایج با نتایج حاصل از توابع ارائه شده

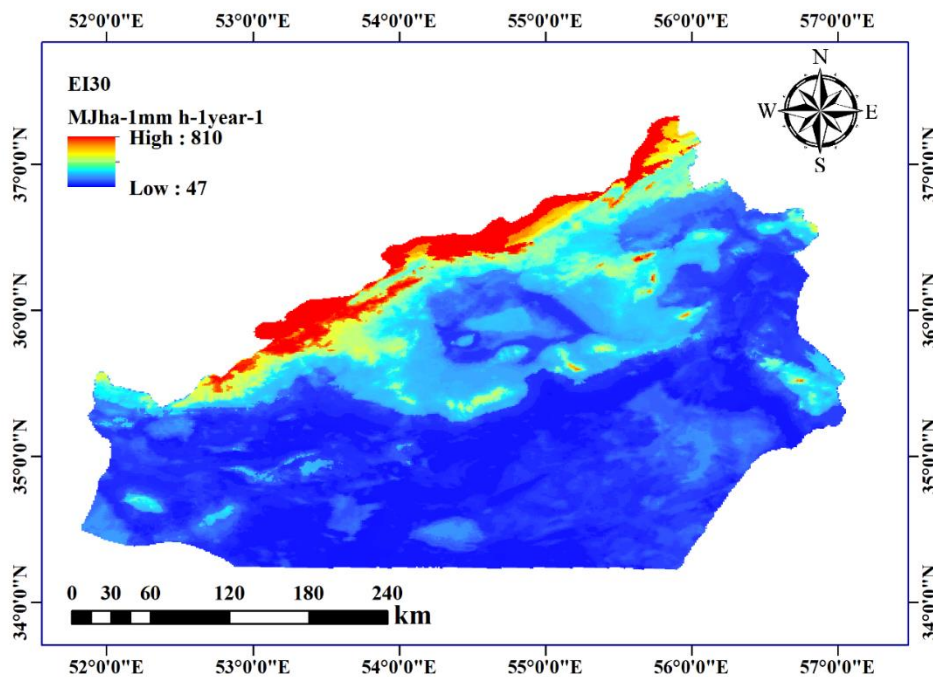
نبود اطلاعات فرساینده‌گی باران در کشور و کمبود و نقص در اطلاعات شدت بارندگی در بسیاری از ایستگاه‌های سینوپتیک کشور باعث شده که محققان از معادلات ارائه شده در دیگر مناطق دنیا، برای پهنه‌بندی فرساینده‌گی باران در کشور استفاده کنند (Dolabian *et al.*, 2021). یکی از معادلات معرف ارایه شده، معادله توانی بود که (Render and Friedman, 1994) برای محاسبه فرساینده‌گی باران با استفاده از متوسط بارش سالانه ارائه کردند. این معادله به فراوانی برای محاسبه فرساینده‌گی باران در مناطق فاقد داده‌های شدت بارندگی از جمله ایران استفاده شده است (Kim *et al.*, 2005; Yudin *et al.*, 2018; Dolabian *et al.*, 2021). شکل معادله (Render and Friedman, 1994) در مناطقی بارش سالانه کمتر ۸۵۰ میلیمتر به صورت زیر می‌باشد.

$$R = 0.0483P^{1.61} \quad (P \leq 850 \text{ mm})$$

(رابطه ۶)

که در این معادله P متوسط بارندگی سالانه بر حسب میلیمتر است.

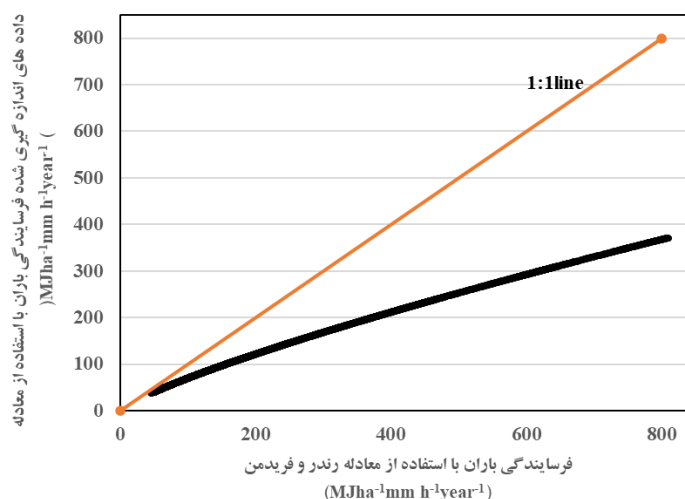
در این مطالعه به منظور بررسی دقت معادلات ارائه شده توسط (Render and Friedman, 1994) در ابتدا بر اساس بارندگی استان، نقشه فرساینده‌گی باران با استفاده از معادله (۶) تعیین و سپس داده‌های نقشه بدست آمده با نقشه بدست آمده از معادله شکل (۷) مقایسه شد. شکل (۱۰) نقشه فرساینده‌گی باران را بر اساس معادله رندر و فریدمن نشان می‌دهد. مقادیر فرساینده‌گی باران بین ۴۷ تا ۸۱۰ MJha⁻¹mm h⁻¹year⁻¹ متغیر بود. این نتایج نشان می‌دهد در مقادیر زیاد بارندگی تفاوت دو برابری بین معادله رندر و فریدمن و معادله ارائه شده در این مطالعه وجود دارد. این نتایج نشان می‌دهد که استفاده از معادله رندر و فریدمن می‌تواند سبب افزایش دو برابری (۲۰۰ درصدی) در برآورد فرسایش در مناطق شمالی استان بر اساس معادله RUSLE شود. از آنجایی که بیشتر فرسایش آبی در استان در مناطق شمالی رخ می‌دهد، بنابراین خطا در برآورد فرساینده‌گی ممکن است مدیران و تصمیم‌گیران عرصه منابع طبیعی را در اجرای طرح‌های حفاظتی با اشتباهاتی روبرو نماید و حجم و اندازه سازه‌های رسوبگیر به طور معنی‌داری افزایش یابد. با توجه به نتایج بدست آمده پیشنهاد می‌شود در استفاده از معادلات دیگر محققین برای برآورد فرساینده‌گی باران دقت بیشتری شده و معادلات ارایه شده در مناطق مورد مطالعه واسنجی شوند.



شکل ۱۰- نقشه فرساینده‌گی استان سمنان بر اساس معادله رندر و فریدمن (معادله ۶)

ارتباط بین مقادیر فرساینده‌گی باران بر اساس داده‌های شکل‌های (۸) و (۱۰) در شکل (۱۱) نشان داده شده است. برای رسم این شکل ابتدا مقادیر فرساینده‌گی دو نقشه استخراج و در یک دستگاه مختصات کارترین ترسیم شد و برای بررسی ارتباط بین داده‌های از خط ۱:۱ استفاده شد. اگر داده‌های دو نقشه به خط ۱:۱ نزدیک باشند، نشان دهنده تشابه این دو نقشه می‌باشد، در صورت فاصله گرفتن نقاط

از خط ۱:۱ مقادیر محاسبه شده فرساینده‌گی حاصل از معادله رندر و فریدمن دارای بیش یا کم برآورد هستند. نتایج نشان می‌دهد که مقادیر فرساینده‌گی باران بر اساس معادله رندر و فریدمن در تمامی مقادیر از خط ۱ به ۱ فاصله داشته و نشان می‌دهد که معادله رندر و فریدمن مقادیر فرساینده‌گی را بیشتر از واقعیت برآورد می‌کنند. متوسط میزان تفاوت بین رابطه رندر و فریدمن با نقشه بهینه شده فرساینده‌گی استان برابر با $67 \text{ MJha}^{-1}\text{mm h}^{-1}\text{year}^{-1}$ تعیین شد. همچنین متوسط وزنی فرساینده‌گی باران بر اساس معادله رندر و فریدمن $118/5 \text{ MJha}^{-1}\text{mm h}^{-1}\text{year}^{-1}$ بدست آمد که نسبت به معادله ارائه شده در استان که متوسط فرساینده‌گی استان را $75 \text{ MJha}^{-1}\text{mm h}^{-1}\text{year}^{-1}$ نشان می‌دهد، دارای خطای ۱۵۷ درصدی می‌باشد. از آنجایی که فرسایش خاک از حاصل ضرب عوامل موثر بر فرسایش (معادله ۱) به دست می‌آید، بنابراین خطا در برآورد هر یک از متغیرهای مورد استفاده در معادله سبب خطا در میزان فرسایش خواهد شد. به عنوان مثال اگر مقدار فرساینده‌گی باران دو برابر مقدار واقعی برآورد شود، سبب می‌شود که مقدار فرسایش هم دو برابر بیش از مقدار واقعی برآورد شود. این نتایج نشان می‌دهد که در صورت استفاده از معادله رندر و فریدمن در برآورد فرساینده‌گی باران در منطقه مورد مطالعه سبب می‌شود که بفرسایش برآورد شده با استفاده از معادله RUSLE، میزان فرسایش در منطقه را حدود $1/57$ برابر مقدار واقعی برآورد کند. بنابراین در برآورد دقیق فرسایش، وجود نقشه دقیق فرساینده‌گی باران ضروری می‌باشد.



شکل ۱۱- رابطه بین داده‌های نقشه‌های فرساینده‌گی باران حاصل از شکل‌های ۸ و ۱۰

نتیجه‌گیری

این تحقیق با هدف دستیابی به یک روش مناسب و جدید تهیه نقشه فرساینده‌گی، کمک شایان توجهی به مدیریت و برنامه‌ریزی بهینه در حوزه‌های آبخیز خواهد نمود؛ چرا که کمبود اعتبارات و محدودیت‌های فنی و اقتصادی ایجاب می‌کند که اقدامات حفاظتی در مناطقی انجام گیرد که بیشتر در معرض فرسایش بارانی هستند. کمبود اطلاعات بارش و استفاده از مدل‌های ارائه شده در دیگر نقاط دنیا برای محاسبه فرساینده‌گی با وجود تفاوت بسیار زیاد در نوع اقلیم مناطق، عامل مهمی در افزایش میزان خطاست. لذا استفاده از نقشه بارش بر پایه داده‌های شبکه‌ای بارش و متغیرهای کمکی می‌تواند راه حلی جهت تکمیل داده‌های بارش و محاسبه ضریب فرساینده‌گی دقیق باشد. نتایج همبستگی بالایی بین متغیرهای کمکی پوشش گیاهی، ارتفاع داده‌های شبکه بارش و بارش استان نشان داد که می‌تواند راهگشای مطالعات آینده باشد. در بسیاری از مطالعات از داده‌های شبکه‌ای بارش در مدلسازی هیدرولوژیکی استفاده می‌شود. این داده‌ها معمولاً مقادیر بارش را بیش یا کمتر از مقدار واقعی برآورد می‌کنند. در حالی که نتایج این پژوهش نشان داد که داده‌های شبکه‌ای بارش قبل از استفاده در مطالعه هیدرولوژیکی، کشاورزی و فرسایش باید واسنجی شده و سپس مورد استفاده قرار گیرند. بررسی ارتباط بین فرساینده‌گی باران و بارش سالانه نشان داد که همبستگی بالا و معنی دار در سطح ۱ درصد بین این دو خصوصیت وجود دارد ($t=0.96^{**}$). لذا در مطالعات آینده، و در دیگر مناطق فاقد داده می‌توان از بارش سالانه در برآورد فرساینده‌گی باران بهره برد. در این تحقیق ابتدا با استفاده از متغیرهای کمکی نقشه بارندگی استان ترسیم و سپس بر اساس معادله بدست آمده در ایستگاه‌های سینوپتکی دارای باران‌نگار فرساینده‌گی محاسبه و در نهایت منجر به ترسیم نقشه دقیق فرساینده‌گی کل استان گردیده است. پهنه بندی بارش استان نشان داد که



بارندگی در مناطق شمالی استان بیشتر از مناطق جنوبی بوده و به تبع آن، این مناطق دارای بیشترین مقدار فرساینده‌گی بوده و خطر فرسایش در آنها بیش از مناطق دیگر استان می‌باشد. از طرف دیگر مناطق شمالی استان بدلیل پراکنش بالایی جمعیت و وجود خاک حاصلخیز کشاورزی از اهمیت بالایی برخوردار هستند. کشاورزی در بسیاری از مناطق شمالی استان به علت پرشیب بودن این اراضی در اراضی با شیب بالا انجام می‌گیرد، بنابراین نتایج در ارائه طرح‌های حفاظت خاک، کنترل فرسایش و مدیریت اراضی قابل استفاده است. به عنوان مثال در این مناطق می‌توان با تهیه نقشه فرساینده‌گی و تلفیق آن با نقشه‌های پوشش گیاهی، خاک شیب نقاط با توان فرسایش بالا را تعیین و نسبت به اقدامات اضطراری حفاظتی اقدام کرد. از طرف دیگر در مناطق جنوبی استان به دلیل کمبود بارش، فرساینده‌گی باران و فرسایش آبی کمتر بوده، اما نقشه بارش استان نشان داد که میزان بارندگی در بسیاری از این مناطق کمتر از ۱۰۰ میلی‌متر در سال می‌باشد. پایین بودن بارش در این مناطق و کمبود رطوبت خاک باعث می‌شود که این مناطق تبدیل به کانون‌های تولید گرد و غبار شوند که می‌تواند مشکلاتی را برای استان سمنان و مناطق هم‌جوار ایجاد کند. مقایسه نتایج با تحقیقات انجام شده با استفاده از روش‌های درون‌یابی، نشان می‌دهد استفاده از شیوه‌های نوین داده‌کاوی جهت تهیه نقشه بارش و مدل‌سازی و پردازش در محیط برنامه‌نویسی R، با دقت بالاتری همراه بوده است. شایان ذکر است استفاده از دامنه وسیع‌تری از داده‌ها به ویژه از مناطق هم‌جوار استان با اقلیم مشابه، می‌تواند به کاهش میزان خطا در برآورد معادله‌ی مناطق مورد مطالعه کمک نماید.

سپاس‌گزاری

این پژوهش مستخرج از طرح پژوهشی مشترک بین دانشگاه سمنان و اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان سمنان با شماره قرارداد 4830 می‌باشد. بدین وسیله نویسندگان مقاله از حمایت‌های اداره کل مذکور کمال تشکر را دارند.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCE

- Akbarzadeh, M., Moghadam, M. R., Jalili, A., Jafari, M., & Arzani, H. (2007). Effect of precipitation on cover and production of rangeland plants in Polour. *Iranian Journal of Natural Resources Research*, 60, 307-322. (In Persian)
- Amundson, R., Berhe, A. A., Hopmans, J. W., Olson, C., Sztein, A. E., & Sparks, D. L. (2015). Soil and human security in the 21st century. *Science*, 348(6235), 1261071.
- Cheng, J., Liang, S., Wang, J., & Li, X. (2009). A stepwise refining algorithm of temperature and emissivity separation for hyperspectral thermal infrared data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 48(3), 1588-1597.
- Chen, G., Sha, W., Iwasaki, T., & Ueno, K. (2012). Diurnal variation of rainfall in the Yangtze River Valley during the spring-summer transition from TRMM measurements. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117(D6).
- Cheshmberah, F., Zolfaghari, A. A., Taghizadeh-Mehrjardi, R., & Scholten, T. (2022). Evaluation of mathematical models for predicting particle size distribution using digital soil mapping in semiarid agricultural lands. *Geocarto International*, just accepted. doi.org/10.1080/10106049.2022.2076911
- Chu, D., Lu, L., & Zhang, T. (2007). Sensitivity of normalized difference vegetation index (NDVI) to seasonal and interannual climate conditions in the Lhasa area, Tibetan plateau, China. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 39(4), 635-641.
- De Kauwe, M. G., Taylor, C. M., Harris, P. P., Weedon, G. P., & Ellis, R. J. (2013). Quantifying land surface temperature variability for two Sahelian mesoscale regions during the wet season. *Journal of Hydrometeorology*, 14(5), 1605-1619.
- Doulabian, S., Toosi, A. S., Calbimonte, G. H., Tousi, E. G., & Alaghmand, S. (2021). Projected climate change impacts on soil erosion over Iran. *Journal of Hydrology*, 598, 126432.
- Gazanfari Moqhadam M, Alizadeh A, Mousavi Baygi M, Farid Hosseini A, Banayan Avail M. 2011. In order to compare interpolation methods used in forecasting models PERSIANN with daily rainfall data (Case study: Northern Khorasan). *Journal of Soil and Water*. 25(1): 215-207. (In Persian).
- Ghebregabher, M. G., Yang, T., Yang, X., & Sereke, T. E. (2020). Assessment of NDVI variations in responses to climate change in the Horn of Africa. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 23(3), 249-261.

- Grillakis, M. G., Polykretis, C., & Alexakis, D. D. (2020). Past and projected climate change impacts on rainfall erosivity: Advancing our knowledge for the eastern Mediterranean island of Crete. *Catena*, 193, 104625.
- Hakim Khani, Sh.; Hakim Khani, A. 2010. Prohibition of rain erosion map for Lorestan province. *Quarterly Journal of Watershed Management Research (Research and Construction)*. 89: 62-72. (In Persian)
- Hengl T. (2018). Monthly precipitation in mm at 1 km resolution based on SM2RAIN-ASCAT 2007-2018, IMERGE, CHELSA Climate and WorldClim.
- Huffman, G. J., Bolvin, D. T., Nelkin, E. J., Wolff, D. B., Adler, R. F., Gu, G.,... & Stocker, E. F. (2007). The TRMM multisatellite precipitation analysis (TMPA): Quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales. *Journal of hydrometeorology*, 8(1), 38-55.
- Jing, W., Zhang, P., Jiang, H., & Zhao, X. (2017). Reconstructing satellite-based monthly precipitation over Northeast China using machine learning algorithms. *Remote Sensing*, 9(8), 781.
- Kavian, A.; Jafarian, Z.; Jahanshahi, M. (2016). Mapping of rain erosion in Kerman province by geostatistical methods. 2016, *Natural Geography Research*, Volume 48, Number 1, pp. 51-68. (In Persian)
- Kim, J.B., Saunders, P., Finn, J.T., (2005). Rapid assessment of soil erosion in the Rio Lempa Basin, Central America, using the universal soil loss equation and geographic information systems. *Environ. Manage.* 36 (6), 872-885.
- Kimani, M. W., Hoedjes, J. C., & Su, Z. (2017). An assessment of satellite-derived rainfall products relative to ground observations over East Africa. *Remote sensing*, 9(5), 430.
- Khosravi, M., Zolfaghari, A., Kaboli, S. H., & Ghafari, H. (2022). Application of Digital Soil Mapping in Soil Particle Size Zonation and Estimation of Saturated Soil Hydraulic Conductivity for Optimal Management of Watersheds (Case Study: Damghanrood Watershed). *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53(2), 245-261. (In Persian)
- Kühnlein, M., Appelhans, T., Thies, B., & Nauss, T. (2014). Improving the accuracy of rainfall rates from optical satellite sensors with machine learning—A random forests-based approach applied to MSG SEVIRI. *Remote Sensing of Environment*, 141, 129-143.
- Lal, R., & Elliot, W. (1994). Erodibility and erosivity. *Soil Erosion Research Methods*. Soil and Water Conservation Society. Ankeny, 181-20.
- Lee, J. H., & Heo, J. H. (2011). Evaluation of estimation methods for rainfall erosivity based on annual precipitation in Korea. *Journal of Hydrology*, 409(1-2), 30-48.
- Lee, M. H., & Lin, H. H. (2015). Evaluation of annual rainfall erosivity index based on daily, monthly, and annual precipitation data of rainfall station network in Southern Taiwan. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 11(6), 214708.
- Liaw, A. (2002). Wiener M. Classification and regression by randomForest. *R News*, 2(3), 18-22.
- Liu, Y., Zhao, W., Liu, Y., & Pereira, P. (2020). Global rainfall erosivity changes between 1980 and 2017 based on an erosivity model using daily precipitation data. *Catena*, 194, 104768.
- McBratney, A. B., Santos, M. M., & Minasny, B. (2003). On digital soil mapping. *Geoderma*, 117(1-2), 3-52.
- Moradi, HR.; Behzadfar, M.; Sadeghi, S.H.R. (2006). Investigating the relationship between rainfall parameters and rain erosion factor in Khuzestan province. *Scientific Journal of Agriculture*, 29 pp. 69-83. (In Persian)
- Nearing, M. A., Yin, S. Q., Borrelli, P., & Polyakov, V. O. (2017). Rainfall erosivity: An historical review. *Catena*, 157, 357-362.
- Nik Kami, D.; Mehdiان, M, H. 2014. Preparation of a suitable rainfall index map of the country. *Journal of Watershed Engineering and Management*. pp. 364-376. (In Persian)
- Panagos, P., Borrelli, P., Meusburger, K., Yu, B., Klik, A., Jae Lim, K.,... & Ballabio, C. (2017). Global rainfall erosivity assessment based on high-temporal resolution rainfall records. *Scientific reports*, 7(1), 1-12.
- Petkovšek, G., & Mikoš, M. (2004). Estimating the R factor from daily rainfall data in the sub-Mediterranean climate of southwest Slovenia/Estimation du facteur R à partir de données journalières de pluie dans le climat sub-méditerranéen du Sud-Ouest de la Slovénie. *Hydrological sciences journal*, 49(5).
- Renard, K.G., Freimund, J.R. (1994). Using monthly precipitation data to estimate the R factor in the revised USLE.
- Richard, Y., & Pocard, I. J. I. J. O. R. S. (1998). A statistical study of NDVI sensitivity to seasonal and interannual rainfall variations in Southern Africa. *International Journal of Remote Sensing*, 19(15), 2907-2920.



- Rutebuka, J., De Taeye, S., Kagabo, D., & Verdoodt, A. (2020). Calibration and validation of rainfall erosivity estimators for application in Rwanda. *Catena*, 190, 104538.
- Salarvand, J., Ghasemi Aghbash, F., & Asodolahi, Z. (2019). Mapping rainfall erosivity in Lorestan province using Kriging geostatistic technique. *Journal of Climate Research*, 1397(36), 57-72.
- Satgé, F., Xavier, A., Pillco Zolá, R., Hussain, Y., Timouk, F., Garnier, J., & Bonnet, M. P. (2017). Comparative assessments of the latest GPM mission's spatially enhanced satellite rainfall products over the main Bolivian watersheds. *Remote Sensing*, 9(4), 369.
- Shahhosein, T., Nazarnejad, H., & Asadzadeh, F. (2022). Rainfall Erosivity Mapping for West Azerbaijan Province. *Applied Soil Research*, 9(4), 49-61.
- Sharifan, H. (2007). Investigating the relationships between erosion coefficient and different rainfall parameters in Gorgan region. *Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources*, p.207. (In Persian)
- Sharma, M., Bangotra, P., Gautam, A. S., & Gautam, S. (2021). Sensitivity of normalized difference vegetation index (NDVI) to land surface temperature, soil moisture and precipitation over district Gautam Buddh Nagar, UP, India. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 1-11.
- Spracklen, D. V., Arnold, S. R., & Taylor, C. M. (2012). Observations of increased tropical rainfall preceded by air passage over forests. *Nature*, 489(7415), 282-285.
- Sokol, Z., & Bližňák, V. (2009). Areal distribution and precipitation-altitude relationship of heavy short-term precipitation in the Czech Republic in the warm part of the year. *Atmospheric Research*, 94(4), 652-662.
- Teng, H., Ma, Z., Chappell, A., Shi, Z., Liang, Z., & Yu, W. (2017). Improving rainfall erosivity estimates using merged TRMM and gauge data. *Remote Sensing*, 9(11), 1134.
- Uddin, K., Abdul Matin, M., Maharjan, S. (2018). Assessment of land cover change and its impact on changes in soil erosion risk in Nepal. *Sustainability* 10 (12), 4715.
- Wang, J., Rich, P. M., & Price, K. P. (2003). Temporal responses of NDVI to precipitation and temperature in the central Great Plains, USA. *International journal of remote sensing*, 24(11), 2345-2364.
- Wilding, L., 1985. Spatial variability: its documentation, accomodation and implication to soil surveys, Soil spatial variability, Las Vegas NV, 30 November-1 December 1984. pp. 166-194.
- Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1978). Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning (No. 537). Department of Agriculture, Science and Education Administration.
- Yin, S. Q., Xie, Y., Liu, B., & Nearing, M. A. (2015). Rainfall erosivity estimation based on rainfall data collected over a range of temporal resolutions. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(10), 4113-4126.
- Yosefikebriya, A., Nadi, M & sheikhi arjanki, sh. (2019). Increase The accuracy of monthly and annual precipitation maps using covariates In Mazandaran province. *Iranian water research journal*. 14(3), 107-114. (In Persian)
- Zanjani, B., Seyed Kaboli, H., & Rashidian, M. (2019). Downscaling TRMM satellite-based precipitation data using non-stationary relationships between precipitation and land surface characteristics. *Journal of RS and GIS for Natural Resources*, 10(2), 85-101. (In Persian)
- Zareh, S, Soltanei, S., & Taze, M. (2019). Assessment spatial variability of rainfall erosivity factor (Case study: Fars Province). *Geography and Planning*, 23(68), 157-177.
- Zarekia, S., Zare, N., Ehsani, A., Jafari, F., & Yeganeh, H. (2012). Relationship between rainfall and annual forage production of important range species (case study: Khoshkerood-Saveh). *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 19(4), 614-623. (In Persian)
- Zhang, X., Friedl, M. A., Schaaf, C. B., Strahler, A. H., & Liu, Z. (2005). Monitoring the response of vegetation phenology to precipitation in Africa by coupling MODIS and TRMM instruments. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 110(D12).
- Zhong, L., Ma, Y., Salama, M., & Su, Z. (2010). Assessment of vegetation dynamics and their response to variations in precipitation and temperature in the Tibetan Plateau. *Climatic change*, 103(3), 519-535.