

## تهیه نقشه لندفرم‌ها و بررسی ارتباط آن با میزان خشکسالی به کمک روش ژئومورفون و مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (مورد: شرق و جنوب استان فارس)

محمد مهدی قاسمی - عضو هیات علمی موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، مجتبی پاک پرور - استادیار بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی فارس، مرصیه مکرّم \* - دانشیار بخش تکنولوژی مرتع و آبخیز، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی داراب، دانشگاه شیراز.

پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۸/۱۴      تأیید نهایی: ۱۴۰۰/۰۵/۰۷

### چکیده

خشکسالی از جمله مخاطرات آب و هوایی است که به رغم وقوع تدریجی آن در مقیاس مکانی گسترده‌ای اثرگذار است و می‌تواند بخش بزرگی از جامعه روستایی و شهری را در معرض خطر قرار دهد، از این رو ایجاد یک چهارچوب جامع و مکانی برای تهیه یک نقشه نواحی مستعد خشکسالی به منظور تعدیل آثار و پیش‌بینی نسبی آن، یکی از اقداماتی است که در الویت ارکان مدیریت محیط قرار می‌گیرد. در این راستا بررسی ارتباط بین نواحی مستعد خشکسالی و نوع لندفرم‌ها در نواحی خشک و نیمه خشک یکی از دغدغه‌های مشترک دانش آب و هواشناسی و ژئومورفولوژی است. با توجه به اهمیت موضوع، هدف از این مطالعه بررسی و تعیین نواحی مستعد خشکسالی در نواحی شرق و جنوب استان فارس و ارتباط آن با نوع لندفرم‌ها با استفاده از روش AHP و فازی می‌باشد. در این مطالعه برای تعیین لندفرم‌های منطقه از روش ژئومورفون استفاده شد. همچنین برای تعیین وضعیت خشکسالی منطقه مورد مطالعه از روش فازی و مدل تحلیل سلسله مراتبی استفاده شد. نتایج حاصل از مقایسه دو به دوی هر یک از پارامترها نشان داد که بارندگی و عمق آب زیرزمینی با وزن‌های ۰/۲۸ و ۰/۰۱ به ترتیب با اهمیت ترین و کم اهمیت ترین پارامتر در تعیین مناطق مستعد خشکسالی در منطقه مورد مطالعه می‌باشند. نتایج حاصل از روش فازی و AHP نشان داد که بخش‌های شرقی و جنوب شرقی منطقه مستعد خشکسالی هستند. نتایج حاصل از روش ژئومورفون نشان داد که منطقه مورد مطالعه شامل ۱۰ نوع لندفرم می‌باشد که لندفرم نوع slope و super به ترتیب بیشترین و کمترین مساحت منطقه را شامل می‌شود (۲۵٪ و ۲٪). همچنین نتایج حاصل از ارتباط بین نوع لندفرم و خشکسالی نشان داد که در بخش‌هایی از منطقه که شامل لندفرم Flat است میزان خشکسالی در کلاس متوسط تا زیاد قرار دارد، در حالیکه لندفرم‌های super دارای حداقل میزان خشکسالی هستند. با توجه به دقت بالای مدل می‌توان این نتیجه را گرفت که با استفاده از لندفرم‌ها می‌توان وضعیت خشکسالی مناطق را پیش‌بینی نمود. بطوریکه در نواحی که بیشتر از نوع لندفرم‌های super هستند احتمال خشکسالی کمتر و در لندفرم‌های Flat بیشترین احتمال خشکسالی وجود دارد.

واژگان کلیدی: خشکسالی، لندفرم، فازی، مدل تحلیلی سلسله مراتبی، روش ژئومورفون، شرق و جنوب استان فارس.

## مقدمه

بر خلاف سایر مخاطرات طبیعی مانند زلزله و سیل، خشکسالی تدریجی است و ممکن است چندین سال ادامه یابد (تونینی<sup>۱</sup> و همکاران ۲۰۱۲). از آنجا که حوادث شدید خشکسالی می‌تواند بخش بزرگی از جامعه را در معرض خطر قرار دهد، تهیه نقشه نواحی مستعد خشکسالی مهم می‌باشد (بیازتاس<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۱۸). مطالعات نشان می‌دهد که خشکسالی از چهار دیدگاه قابل بررسی می‌باشد که شامل خشکسالی هواشناسی، کشاورزی، هیدرولوژیکی و اقتصادی-اجتماعی است (هیم<sup>۳</sup>، ۲۰۰۲). در خشکسالی هواشناسی مسائلی مانند کمبود بارش بررسی می‌شود و نواحی و که از یک حد معمول دارای بارندگی کمتری هستند به عنوان نواحی در معرض خشکسالی مشخص می‌شوند. در خشکسالی کشاورزی از پارامترهایی مانند رطوبت خاک برای تامین نیازهای گیاه برای تعیین خشکسالی استفاده می‌شود (میشرا<sup>۴</sup> و سینگه<sup>۵</sup>، ۲۰۱۰). در خشکسالی هیدرولوژیکی پارامترهایی مانند کمبود بارش، کاهش جریان رواناب و کاهش منابع آب بررسی می‌شود. درحالی‌که در خشکسالی اقتصادی و اجتماعی نیاز مردم و فعالیت‌های آن‌ها بررسی می‌شود (ژانگ<sup>۶</sup> و همکاران، ۲۰۱۷). بنابراین تعیین خشکسالی‌ها و هشدارهای اولیه، منجر به کاهش تلفات خواهد شد. بنابراین ارزیابی و تعیین مناطق مستعد خشکسالی مهم می‌باشد. بررسی خشکسالی به صورت ترکیبی از هواشناسی و هیدرولوژی با توجه به افزایش دمای زمین در سال‌های اخیر مهم می‌باشد. از طرفی ارتباط خشکسالی با پارامترهایی مورفومتری مانند نوع لندفرم و شکل حوضه آبخیز می‌تواند منجر به پیش بینی خشکسالی با توجه به وضعیت مورفومتری حوضه آبخیز می‌شود.

کویرینگ<sup>۷</sup> و پاپکریاکو<sup>۸</sup> (۲۰۰۳) از شاخص‌های خشکسالی هواشناسی، Palmer's Z-index، PDSI<sup>۹</sup> و SPI<sup>۱۰</sup> برای بررسی ADH در کانادا استفاده نمودند. نتایج مطالعات آن‌ها نشان داد که شاخص Palmer's Z-index شاخص مناسبی برای بررسی خشکسالی می‌باشد. قبی<sup>۱۱</sup> و همکاران (۲۰۱۰) از یک شاخص جدید به نام SDCI<sup>۱۲</sup> برای بررسی خشکسالی کشاورزی (ADH<sup>۱۳</sup>) استفاده نمودند و پیشنهاد کردند که از این شاخص برای تعیین خشکسالی در مناطق مختلف با اقلیم‌های مختلف می‌توان استفاده نمود. آن‌ها برای شاخص SDCI از داده‌های مربوط به شاخص پوشش گیاهی نرمال (NDVI) و دمای سطح زمین استفاده نمودند. مطالعات نشان داد که کاهش رطوبت خاک منجر به کاهش تبخیر و تعرق و از بین رفتن آب در دسترس برای رشد گیاه می‌شود (مارتنز-فراناندز<sup>۱۴</sup> و همکاران، ۲۰۱۶). رطوبت خاک به طور معمول برای اندازه گیری خشکسالی استفاده نمی‌شود (شیفیلد<sup>۱۵</sup> و همکاران، ۲۰۰۴). کاهش رطوبت خاک نشان دهنده افزایش تبخیر و تعرق و از بین رفتن آب برای رشد گیاه است (شیفیلد و همکاران، ۲۰۰۴). بنابراین از رطوبت خاک شبیه سازی شده به عنوان یکی از پارامترها در بررسی رطوبت خاک می‌توان استفاده نمود. وانگ<sup>۱۶</sup> و

1. Tonini

2. Beyaztas

3. Heim

4. Mishra

5. Singh

6. Zhang

7. Quiring

8. Papakryiakou

9. Palmer's drought severity index

10. standardized precipitation index

11. Rhee

12. scaled drought condition index

13. agricultural drought hazard

14. Martínez-Fernández

15. Sheffield

16. Wang

همکاران (۲۰۱۵) ارتباط بین رطوبت خاک و شاخص‌های مختلف خشک سالی SPI، scPDSI، PDSI، SPEI<sup>۲</sup>، Palmer's Zindex) در چین بررسی کردند که نتایج مطالعات آن‌ها نشان داد که شاخص SPEI دارای دقت بالایی می‌باشد. لیپر<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۱۶) با استفاده از رطوبت خاک و تغییرات آن در مکان و زمان‌های مختلف شدت خشکسالی در ایالات متحده را تجزیه و تحلیل نمودند. مطالعات نشان می‌دهد که برای خشکسالی چهارچوب خاصی وجود ندارد و محققان از شاخص‌های مختلف برای تعیین خشکسالی استفاده نموده‌اند. وو<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۱۸) نشان دادند که پیچیدگی و تنوع پدیده‌های خشکسالی و تعامل آن‌ها با محیط طبیعی، ارزیابی خشکسالی با استفاده از یک شاخص خشکسالی را مشکل می‌کند (هاو و همکاران، ۲۰۱۶). همه شاخص‌های خشکسالی برای همه مکان‌ها و شرایط عملکرد خوبی ندارند (اسووبودا<sup>۵</sup> و همکاران، ۲۰۱۵)، که مانع از توسعه برنامه‌های واقعی برای بهبود و کاهش خشکسالی می‌شود. برخی محققان از رویکردهای دانش محور مانند فرآیند سلسله مراتبی تحلیلی (AHP) برای خطرات خشکسالی و نقشه برداری از ریسک استفاده کرده‌اند (به عنوان مثال چاکرابورتی<sup>۶</sup> و جوسهپی<sup>۷</sup>، ۲۰۱۶؛ ایکرامی<sup>۸</sup> و همکاران، ۲۰۱۶؛ پالچایدهوری<sup>۹</sup> و بیسواس<sup>۱۰</sup>، ۲۰۱۶). درویش زاده و همکاران (۱۳۹۰) پهنه بندی خطر خشکسالی مناطق خشک با استفاده از روشهای دانش مینا در محیط GIS در حوضه شیپور انجام دادند. نتایج نشان داد که از بین روشهای مورد استفاده، روش شاخص وزنی با بالاترین دقت می‌تواند به منظور پهنه بندی خطر خشکسالی مورد استفاده قرار بگیرد. ارزیابی آسیب پذیری خشکسالی کشاورزی در اقلیم‌های خشک و نیمه خشک به کمک GIS و فرایند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) در شهر ستان تفت یزد توسط اکرامی و همکاران (۱۳۹۴) انجام شد. نتایج نشان دهنده دقت بالا روش AHP در تعیین مناطق مستعد خشکسالی می‌باشد. از طرفی تعیین ارتباط بین نوع لندفرم و میزان خشکسالی (ترکیبی از خشکسالی هیدرولوژیکی، کشاورزی و هواشناسی) یکی از موضوعاتی است که در علوم طبیعی کاربردی و مهم می‌باشد. بطوریکه با تعیین ارتباط بین نوع لندفرم و میزان خشکسالی در منطقه را پیش بینی نمود. بنابراین در مطالعه هدف تعیین خشکسالی در مناطق جنوبی استان فارس و تعیین نوع لندفرم‌های این منطقه با استفاده از روش ژئومورفون می‌باشد. همچنین در این مطالعه ارتباط بین نوع لندفرم و میزان خشکسالی پیش بینی می‌شود که از نوآوری‌های این تحقیق می‌باشد. در واقع با تعیین ویژگی‌های مورفومتری حوضه آبخیز مورد مطالعه (لندفرم‌ها) می‌توان خشکسالی در منطقه را پیش بینی نمود. بطوریکه در مناطقی که درصد بیشتر از منطقه شامل ارتفاعات می‌باشد نسبت به مناطقی که بیشتر از دشت تشکیل شده‌اند دارای وضعیت خشکسالی متفاوتی هستند.

1. Self-calibrated PDSI

2. standardized precipitation evapotranspiration index

3. Leeper

4. Wu

5. voboda

6. Chakraborty

7. Joshi

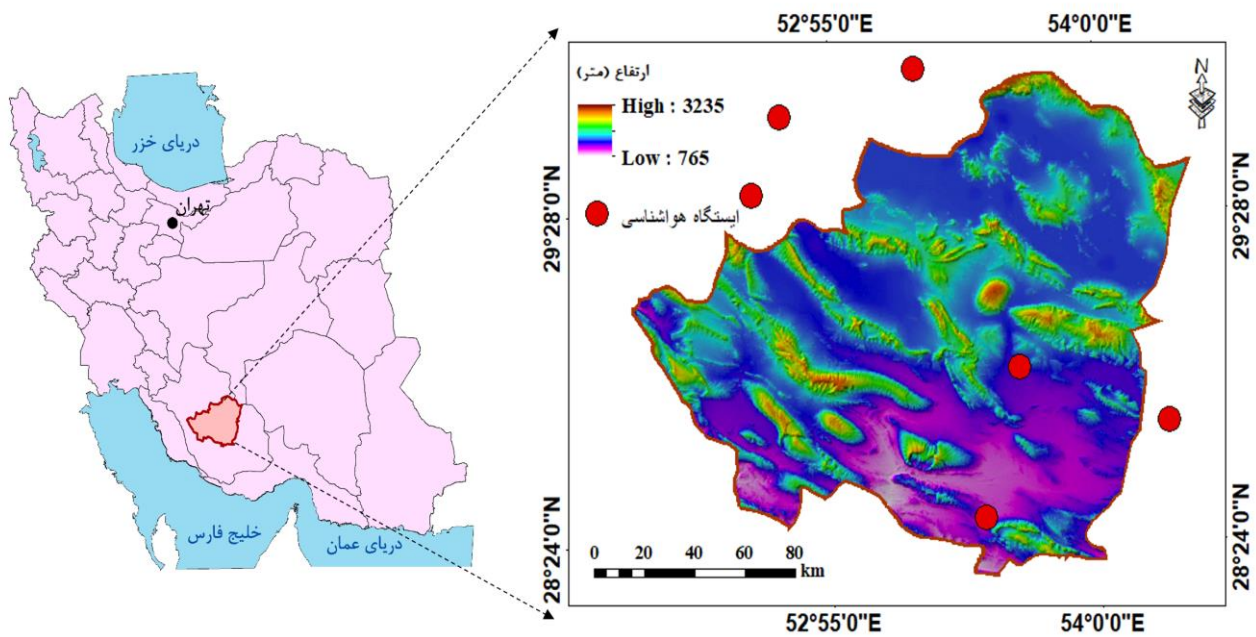
8. Ekrami

9. Palchaudhuri

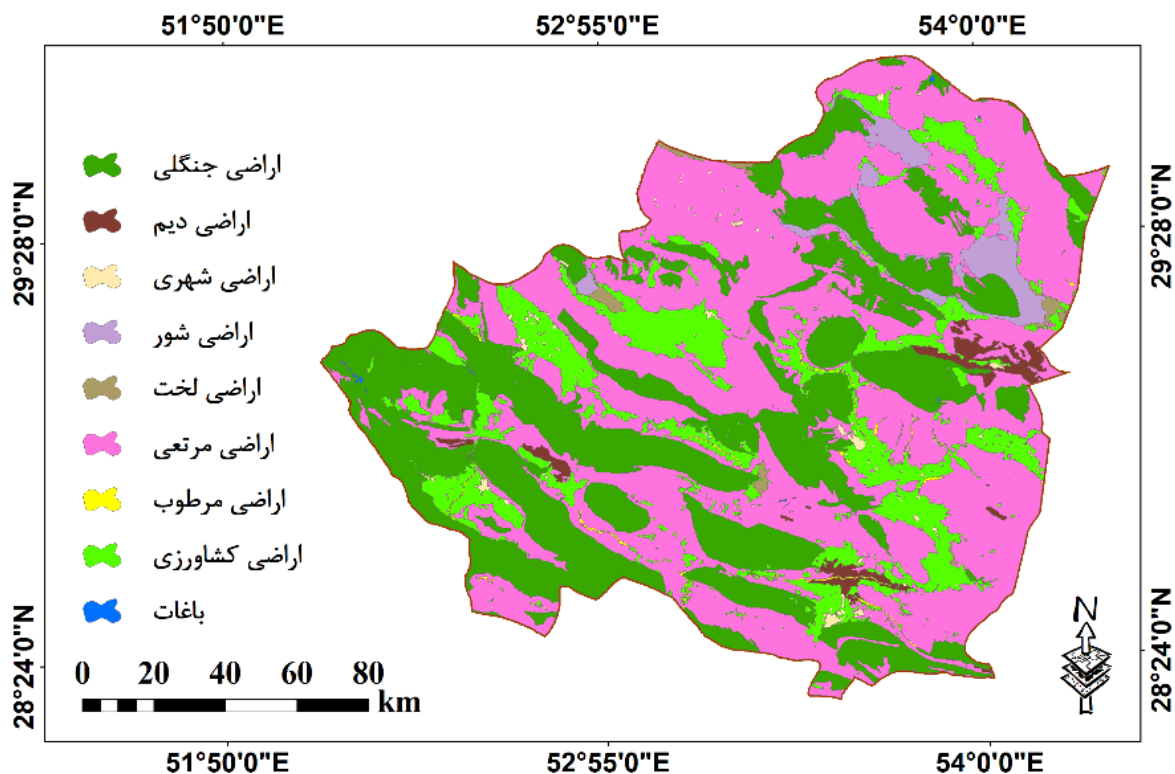
10. Biswas

## منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در محدوده طول های جغرافیایی ۵۲ درجه و ۶۶ دقیقه و ۵۴ درجه و ۱۸ دقیقه و عرض های جغرافیایی ۲۸ درجه و ۱ دقیقه و ۳۰ درجه و ۱۸ دقیقه قرار دارد (شکل ۱). مساحت منطقه مورد مطالعه ۲۳۱۳۹/۹۸ کیلومتر مربع می باشد. شایان ذکر است که منطقه مورد مطالعه بر اساس مرزهای سیاسی شهرستان های نی ریز، استهبان، فسا، جهرم، فیروزآباد، کوار و سروستان می باشد. بیشترین و کمترین ارتفاع منطقه مورد مطالعه ۳۲۳۵ و ۷۶۵ متر به ترتیب می باشد. طبق شکل ۲ کاربری اراضی منطقه شامل اراضی کشاورزی، اراضی بایر، اراضی دیم، اراضی جنگلی، اراضی باغی، اراضی مرتعی، اراضی شور، اراضی شهری، اراضی مرطوب می باشد که کاربری اراضی مرتع با مساحت ۲۳۵۸۰ کیلومتر مربع بیشترین مساحت را دارا می باشد. از نظر اقلیمی بارندگی در منطقه به طور متوسط ۳۰۰ میلی متر و متوسط درجه حرارت ۲۹ درجه سانتی گراد می باشد.



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه (منبع: نگارندگان)



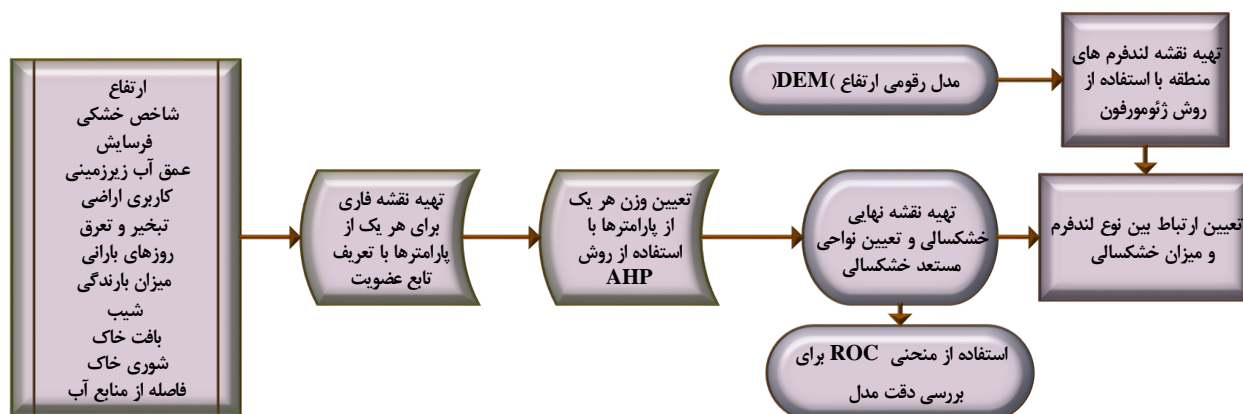
شکل ۲. کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه (منبع: نگارندگان)

### مواد و روش‌ها

در این مطالعه از روش تصمیم‌گیری چند معیاره برای تهیه نقشه مناطق مستعد خشکسالی به طور مکانی استفاده شد که این روش در حقیقت ترکیبی از روش Fuzzy-AHP و تکنیک‌های مکانی می‌باشد. در این مطالعه از ۱۲ پارامتر بافت خاک، عمق آب زیرزمینی، شاخص خشکسالی (نسبت میزان بارندگی سالانه (میلی متر) به میزان تبخیر و تعرق سالانه (میلی متر))، فرسایش خاک، کاربری اراضی، بارندگی، روزهای بارانی، شوری خاک و، شیب، ارتفاع و فاصله از آبراهه به عنوان داده‌های ورودی برای تهیه نقشه خشکسالی و مدل رقومی ارتفاع برای تهیه نقشه لندفرم منطقه مورد مطالعه استفاده شد. این معیارها بعد از تهیه نقشه‌های رستری آن‌ها ارزیابی شده و با استفاده از توابع عضویت نقشه‌های فازی هر یک از پارامترها تهیه و در ادامه وزن دهی به آن‌ها صورت گرفت.

روش پیشنهادی برای این مطالعه به طور خلاصه عبارتند از:

- ۱- تهیه نقشه فاکتورهای کلیدی موثر بر خشکسالی (متغیرهای مستقل)
- ۲- استفاده از روش فازی برای همگن کردن داده‌ها
- ۳- استفاده از روش AHP برای وزن دهی به هر یک از لایه‌ها
- ۴- تهیه نقشه نهایی نواحی مستعد خشکسالی با استفاده از روش fuzzy-AHP
- ۵- تعیین لندفرم‌های منطقه با استفاده از روش ژئومورفون و ارتباط آن با خشکسالی
- ۶- جزئیات مراحل تحقیق در شکل ۳ نشان داده شده است:



شکل ۳. مراحل تحقیق (منبع: نگارندگان)

## روش فازی

منطق فازی در حقیقت درجه واقعی هر یک از پارامترها را بین ۰ تا ۱ برای هدف مورد نظر تعیین می‌کند (زاده<sup>۱</sup>، ۱۹۹۶). از نظر آماری منطقه فازی را می‌توان با معادله ۱ نشان داد:

$$\mu_A(x): X \rightarrow [0,1] \quad (1)$$

که  $\mu_A(x)$  درجه عضویت عنصر  $x$  در یک مجموعه فازی  $A$  می‌باشد و  $X$  مجموعه کلی تعریف شده در یک مساله خاص می‌باشد. مقدار ۰ به امکان‌هایی اختصاص دارد که قطعاً عضو مجموعه مشخصی از  $A$  نیستند در حالیکه ۱ قطعاً عضو مجموعه  $A$  می‌باشد. در این مطالعه  $A$  مناطق مستعد خشکسالی، عوامل خطر و قرار گرفتن در معرض خطر خشکسالی می‌باشد. در این مطالعه از توابع عضویت خطی برای فازی کردن هر یک از پارامترها استفاده شد. به منظور تهیه نقشه فازی برای هر یک از پارامترها از توابع عضویت زیر استفاده شد (معادله ۲ و ۳). برای پارامترهای شیب، ارتفاع، بافت خاک، بارندگی، روزهای بارانی، کاربری اراضی، عمق آب زیرزمینی و میزان بارندگی از تابع عضویت ۲ برای تهیه نقشه فازی استفاده شد. بطوریکه مقادیر بیشتر از حدود بحرانی  $n$  عدد یک و مقادیر کمتر از  $m$  عدد ۰ را دریافت می‌کنند و بینابین  $m$  و  $n$  مقادیر  $n-m / n-m$  را دریافت می‌نمایند.

$$\mu_A(x) = f(x) = \begin{cases} 0 & x \leq m \\ x-m/n-m & m < x < n \\ 1 & x \geq n \end{cases} \quad (2)$$

برای پارامترهای فاصله از رودخانه، شوری خاک، تبخیر و تعرق، فرسایش خاک، شاخص خشکی از تابع عضویت کاهش استفاده شد. بطوریکه مقادیر بیشتر از حدود بحرانی  $n$  عدد صفر و مقادیر کمتر از حدود بحرانی  $m$  عدد ۱ و بین  $m$  و  $n$  مقادیر  $n-x / n-m$  را دریافت نمودند.

$$\mu_A(x) = f(x) = \begin{cases} 1 & x \leq m \\ n-x/n-m & m < x < n \\ 0 & x \geq n \end{cases} \quad (3)$$

روش فرایند تحلیل سلسله مراتبی (AHP<sup>۱</sup>)

پارامتر وزن، پارامتر مهمی برای ارتباط دادن فاکتورهای بکار رفته در تناسب اراضی است. به دلیل اینکه هر یک از ویژگی‌های دارای تأثیر متفاوتی روی خشکسالی هستند، به کمک روش AHP وزن دهی صورت گرفت. روش AHP است که وزن دهی به پارامترها را آسان می‌کند. AHP بر مقایسه جفتی هر یک از پارامترها تکیه دارد. هر یک از فاکتورها بر اساس درجه اهمیتی که برای تعیین مناطق مستعد خشکسالی دارند طبق جدول ۱ در محدوده‌های ۱ تا ۹ قرار می‌گیرند (ساعتی<sup>۲</sup> و وارگاس<sup>۳</sup>، ۲۰۰۱).

جدول ۱. مقیاس بنیادی برای مقایسه زوجی (ساعتی و وارگاس، ۲۰۰۱)

ارزش عددی	ارزش توصیفی	توضیحات
۱	۱	اهمیت برابر
۲	ضعیف	-
۳	تقریباً متوسط	یک فاکتور نسبت به دیگری کمی ارجح‌تر است
۴	متوسط	-
۵	اهمیت بالاتر نسبت به دیگری	یک فاکتور نسبت به دیگری ارجح‌تر است
۶	قوی	-
۷	خیلی قوی	یک عنصر نسبت به دیگری دارای اهمیت زیاد است
۸	خیلی خیلی قوی	-
۹	کاملاً ارجح‌تر	یک عنصر نسبت به دیگری دارای اهمیت خیلی بیشتری است

وقتی پارامتر  $i$  با  $j$  مقایسه می‌شود و دارای یکی از ارزش‌های بالا است، پارامتر  $j$  دارای ارزشی متقابل با ارزش  $i$  می‌باشد (عمل متقابل (دو طرفه))

به عبارت دیگر به کمک ماتریس مقایسه زوجی طبق معادلات ۴ و ۵ ارزش و اهمیت هر معیار نسبت به دیگر معیارها را می‌توان مشخص نمود.

$$a_{ij} = a_{ik} \cdot a_{kj} \quad (۴)$$

$$a_{ij} = 1/a_{ji} \quad (۵)$$

که  $i$  و  $j$  و  $k$  مقادیر مربوط به ماتریس مورد بررسی می‌باشد. در نهایت طبق معادله زیر وزن‌های تعریف شده برای هر یک از پارامترها در نقشه‌های فازی تهیه شده ضرب شد تا نقشه نهایی مناطق مستعد خشکسالی تهیه گردد.

$$\mu_A = \sum_{j=1}^k W_j \times \mu_{A(x)} \quad x \in X \quad (۶)$$

$$\sum_{j=1}^k W_j = 1 \quad W_j > 0 \quad (۷)$$

1. Analytical Hierarchy process

2. Saaty

3. Vargas

با توجه به فرمول بالا مشخص می شود که وزن مربوط به هر یک از پارامترها در محدوده ۰ تا ۱ است و مجموع وزن نهایی برابر با ۱ می باشد

### تهیه لندفرم‌ها با استفاده از روش ژئومورفون

با توجه به اینکه لندفرم‌ها قادر هستند فرایندهای فعال گذشته و فعلی روی زمین را مشخص نموده و اطلاعات ارزشمندی را از ویژگی‌های زمین درباره آب و خاک و پوشش گیاهی ارائه نمایند (گیر سیک، ۲۰۱۰). بنابراین در این مطالعه ارتباط بین لندفرم‌ها با خشکسالی مورد بررسی قرار گرفت. برای تهیه نقشه لندفرم‌ها از ژئومورفون‌ها<sup>۱</sup>، منطقه مورد مطالعه استفاده شد و نقشه‌های ژئومورفیک با استفاده از این روش تهیه شد. ورودی این مدل، DEM با قدرت تفکیک ۳۰ متر می‌باشد که کلیه محاسبات در نرم افزار V.8 SAGA GIS انجام شد. با توجه به اهداف این مقاله، الگوی ۱۰ ژئومورفون انتخاب شد که هسته اصلی استفاده از روش ژئومورفون برای طبقه بندی لندفرم‌ها می‌باشد. ژئومورفون یک ناهمواری ثابت با جهت‌گیری ثابت و انعطاف‌پذیر است. مفاهیم بالاتر، پایین‌تر، همسطح برای یک سلول مرکزی برای شناسایی فرم ایجاد می‌شود. این اصل توسط جاسیویسز<sup>۲</sup> و استیپینسکی<sup>۳</sup> (۲۰۱۱) پیشنهاد شد که با استفاده از ناهمواری سطح و فاصله افقی توصیف و از زاویه‌های زینت<sup>۴</sup> و نادیر<sup>۵</sup> در هشت جهت اصلی قطب نما جهت تفسیر کمک گرفت که این زوایا یک الگوی ۸ گانه (متشکل از سه نماد "-", "0", "+") را به وجود آورده‌اند.

### نتایج

همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده است از ۱۲ پارامتر بافت خاک، عمق آب زیرزمینی، شاخص خشکسالی، فرسایش خاک، کاربری اراضی، بارندگی، روزهای بارانی، شوری خاک و، شیب، ارتفاع و فاصله از آبراهه به عنوان داده‌های ورودی برای تعیین مناطق مستعد خشکسالی استفاده شده است. به منظور تهیه داده‌ها با توجه به در دسترس بودن داده‌های نقطه ای میزان بارندگی، شاخص خشکی، تبخیر، عمق آب زیرزمینی، روزهای بارانی، شوری خاک از روش IDW در محیط GIS برای تهیه نقشه‌های پهنه بندی این داده‌ها استفاده شد. داده‌های بافت خاک، آبراهه، کاربری اراضی و فرسایش از نقش‌های موجود تهیه شد و داده‌های شیب و ارتفاع با استفاده از مدل رقومی ارتفاع تهیه گردید. با توجه به شکل ۴ مشخص می‌شود که میزان ارتفاع در بخش‌های شمالی منطقه بیشتر از بخش‌های جنوب است. بطوریکه بیشترین ارتفاع در شمال ۳۲۳۵ متر و در بخش جنوبی ۷۶۵ متر می‌باشد که با افزایش ارتفاع مناطق مستعد خشکسالی کاهش می‌یابد. شاخص خشکی بین ۰/۳ در بخش‌های غربی و شمال غرب و ۰/۵ در بخش‌های شرقی و جنوب شرقی منطقه مورد مطالعه می‌باشد که نشان دهنده خشکسالی بیشتر می‌باشد. با توجه به شکل ۴ مشخص می‌شود که میزان فرسایش در منطقه مورد مطالعه در ۸ کلاس از کم به زیاد طبقه بندی می‌شود که با افزایش فرسایش میزان خشکسالی در منطقه افزایش می‌یابد. با افزایش آب زیرزمینی میزان خشکسالی در منطقه کاهش می‌یابد. با توجه به شکل ۴ بیشترین میزان عمق آب در بخش‌هایی از شرق و جنوب منطقه مورد مطالعه (۲۷۳ متر) می‌باشد.

1- Gerçek

2- Geomorphons

3- Jasiewicz

4- Stepinski

5- Zenith

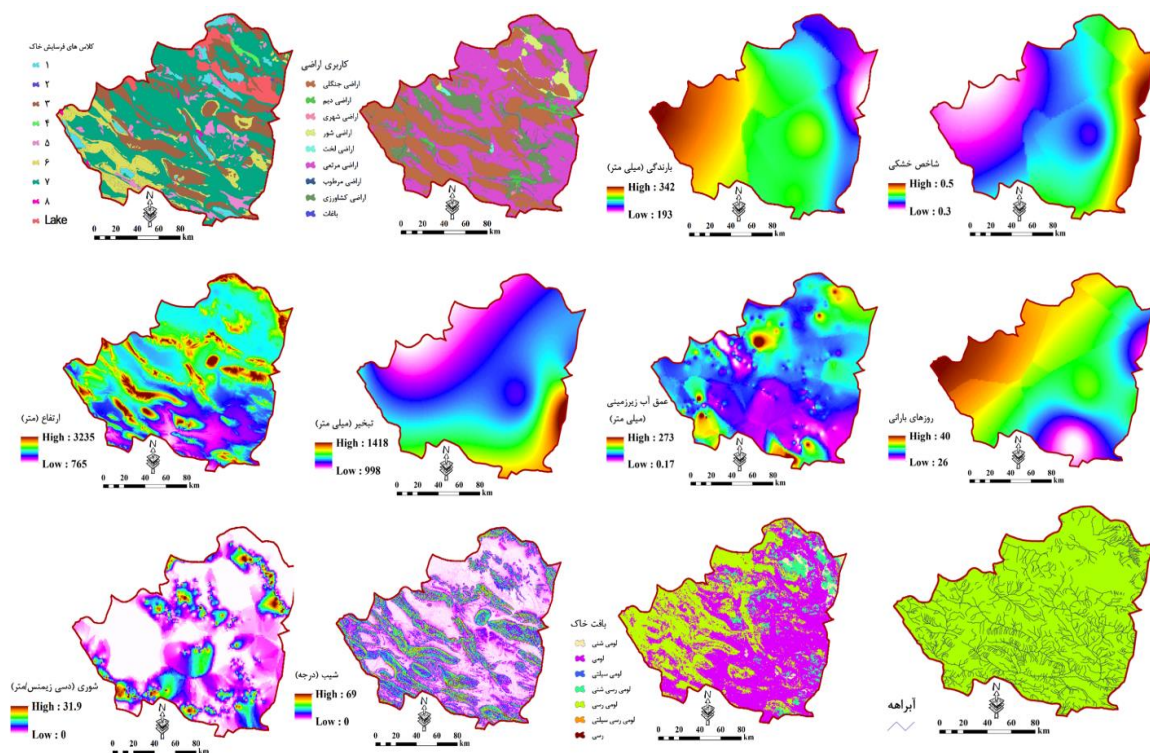
6- Nadir



کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه شامل اراضی مرطوب، باغات، جنگل، اراضی مرتعی، اراضی کشاورزی، اراضی لخت، کشت دیم، اراضی شهری، اراضی شور می‌باشد که با توجه به شکل ۴ مشخص می‌شود که درصد زیادی از منطقه شامل اراضی مرتعی می‌شود که در تشدید خشکسالی در منطقه موثر هستند.

مطالعات نشان داد که کاهش رطوبت خاک منجر به کاهش تبخیر و تعرق و از بین رفتن آب در دسترس برای رشد گیاه می‌شود (مارتنز-فراناندز و همکاران، ۲۰۱۶). بنابراین از تبخیر و تعرق به عنوان یکی از پارامترها در بررسی رطوبت خاک و تعیین خشکسالی می‌توان استفاده نمود. مقادیر تبخیر و تعرق (PET) بین ۹۹۸ و ۱۴۱۸ میلی متر است که بخش‌های جنوبی دارای مقادیر بیشتری می‌باشند. روزهای بارانی در بخش‌های شمال و غرب منطقه مورد مطالعه طبق شکل ۴ بیشتر بوده که حدود ۴۰ روز می‌باشند. مقادیر بارندگی بین ۱۹۳ و ۳۴۲ میلی متر است که بخش‌های غربی و جنوب غربی دارای بارندگی بیشتری می‌باشند.

مقادیر شیب منطقه مورد مطالعه طبق شکل ۴ بین ۰ تا ۶۹ درصد می‌باشد. بافت خاک در کلاس‌های شنی سیلتی، لومی شنی، لومی رسی شنی، لومی رسی سیلتی و رسی طبقه بنی می‌شود که بیشتر منطقه از بافت لومی رسی و لومی می‌باشد. وضعیت شوری منطقه مورد مطالعه در شکل ۴ نشان داده شده است. طبق شکل ۴ مشخص می‌شود که بخش‌های شمالی دارای شوری کمتری ( $ds/m^30$ ) نسبت به بخش‌های ( $31.9 ds/m$ ) جنوبی می‌شوند. فاصله از رودخانه در شکل ۴ نشان داده شده است. بطوریکه بخش‌های شمال شرقی دارای تراکم کمتری از آبراهه می‌باشند.



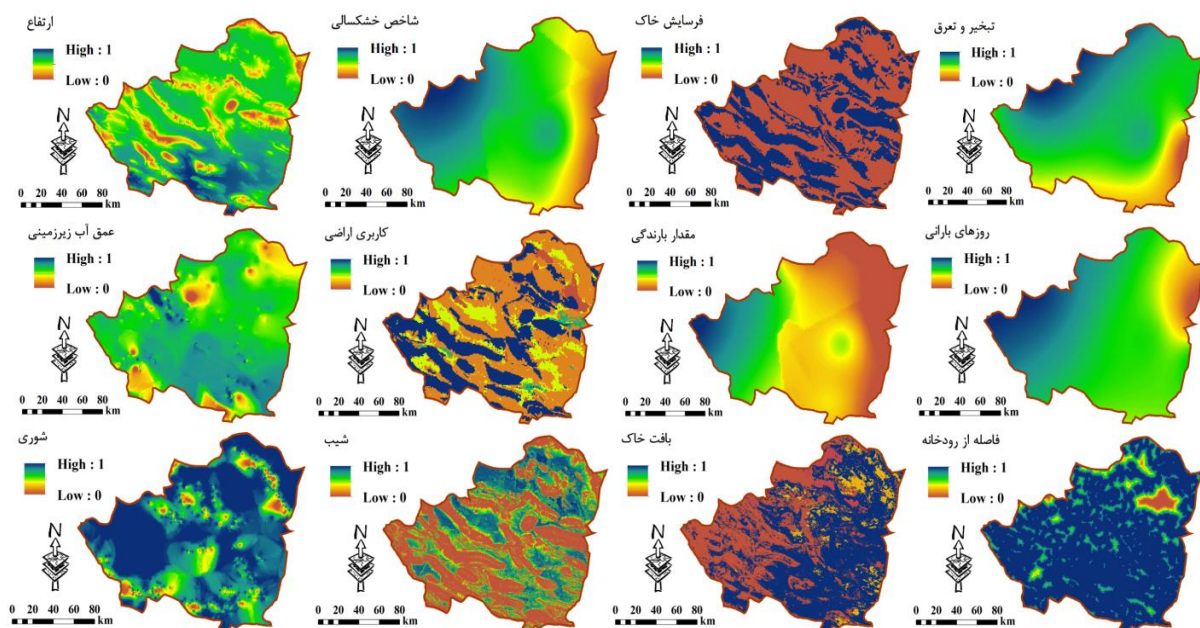
شکل ۴. نقشه پهنه بندی هر یک از پارامترهای موثر در خشکسالی (منبع: نگارندگان)

## روش فازی

در ادامه برای همگن کردن داده‌ها از توابع فازی طبق فرمول ۲ و ۳ استفاده شد و نقشه‌های فازی برای هریک از پارامترهای موثر در خشکسالی تهیه شد که در شکل ۵ نشان داده شده است. همانطور که در معادلات ۲ و ۳ نشان داده شده است، هر چه مقادیر هر یک از پارامترها منجر به خشکی بیشتر در منطقه مورد مطالعه شوند، مقادیر آن پارامتر به سمت اعداد نزدیک به صفر خواهد بود و بالعکس. به طوریکه در شکل ۵ مناطقی که به رنگ قهوه ای نشان داده شده اند، دارای مقادیر نزدیک به صفر می باشند که نشان دهنده تاثیر بیشتر آن پارامتر بر روی خشکسالی منطقه مورد مطالعه می باشد. طبق شکل ۵ شاخص خشکی در بخش‌های شرق و جنوب شرق دارای مقادیر نزدیک به صفر می باشد که نشان دهنده خشکی بیشتر و احتمال خشکسالی بیشتر نسبت به بخش‌های غرب، شمال غرب می باشد. طبق شکل ۵، فرسایش در مناطقی که با رنگ قرمز نشان داده شده نشان دهنده شرایط مناسب‌تر از نظر خشکسالی می باشد. تبخیر و تعرق باعث از دسترس خارج شدن آب قابل دسترس در یک منطقه می شود. این پدیده باعث کاهش آب سطحی، رطوبت خاک و حتی آب زیرزمینی می شود. بنابراین مناطق با تبخیر بیشتر حساسیت بیشتری نسبت به خشکسالی دارند. نقشه فازی تبخیر و تعرق منطقه مورد مطالعه نشان می دهد که بخش‌های جنوب و جنوب شرق دارای مقادیر نزدیک به صفر و صفر هستند که بیانگر خشکسالی بیشتر در این مناطق به علت تبخیر بالاتر می باشد. طبق شکل ۵، نقشه فازی عمق آب زیرزمینی در بخش‌هایی که با رنگ قرمز نشان داده شده است کمتر و دارای مقادیر نزدیک به صفر می باشد که نشان دهنده احتمال خشکسالی کمتر در منطقه می باشد.

نقشه فازی ارتفاع منطقه مورد مطالعه نشان می دهد که در مناطق شمالی که دارای ارتفاع بیشتر می باشند، دارای مقادیر ۱ و نزدیک به ۱ می باشند که نشان دهنده احتمال خشکسالی کمتر می باشند. در حقیقت تغییرات ارتفاعی بر درجه حرارت و مقدار رطوبت تاثیر مستقیم دارد. بنابراین هر چه ارتفاع بیشتر باشد شدت خشکسالی در منطقه کمتر می باشد. طبق شکل ۵ نقشه کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه در مناطقی که مرتع هستند دارای مقادیر نزدیک به صفر می باشند که با رنگ قرمز نشان داده شده است که در این مناطق احتمال خشکسالی بیشتر می باشد. بارندگی از مهمترین پارامترهای موثر در خشکسالی می باشد و در نتیجه مناطق با بارندگی بیشتر، حساسیت کمتری نسبت به خشکسالی دارند. با توجه به شکل ۵ بخش‌های شمال شرق و شرق منطقه مورد مطالعه دارای مقادیر بارندگی کمتر و در نتیجه نزدیک به صفر می باشند که دارای احتمال خشکسالی بیشتر در این مناطق می باشد. نقشه فازی روزهای بارانی منطقه نشان داد که بخش‌های شمال، شمال غرب و جنوب غرب منطقه دارای مقادیر نزدیک به یک می باشند که نشان دهنده خشکسالی کمتر در این مناطق می باشد.

در مناطقی که فاصله از رودخانه بیشتر می باشد احتمال خشکسالی بیشتر است که طبق شکل ۵، مقادیر نزدیک به صفر نشان دهنده فاصله زیاد از رودخانه می باشد. نقشه شیب منطقه نشان داد که مناطقی که در شیب‌های کمتر قرار گرفته اند احتمال خشکسالی در آن‌ها کمتر می باشد که با رنگ آبی و مقادیر ۱ و نزدیک به یک در شکل ۵ نشان داده شده اند. شیب زمین بر میزان آب نفوذی و سطح پایداری خاک تاثیر می گذارد. هر چه شیب بیشتر باشد آب با سرعت بیشتری از منطقه خارج می شود و کمتر نفوذ می نماید و آب در دسترس گیاه کاهش و رطوبت خاک کم می شود. بنابراین نواحی شیبدار نسبت به خشکسالی حساسیت بیشتری دارند. هر چه شوری خاک بیشتر باشد، احتمال خشکسالی به علت عدم رشد گیاه بیشتر می شود. مناطقی که با رنگ آبی نشان داده شده‌اند دارای شوری کمتر و مقادیر فازی نزدیک به ۱ می باشند. طبق شکل ۵ بافت خاک مناطقی که لومی رسی باشد، تشدید کننده فرسایش می باشد که به رنگ قرمز نشان داده شده که دارای مقادیری نزدیک به صفر می باشند.



شکل ۵. نقشه فازی برای هر یک از پارامترهای موثر در خشکسالی (منبع: نگارندگان)

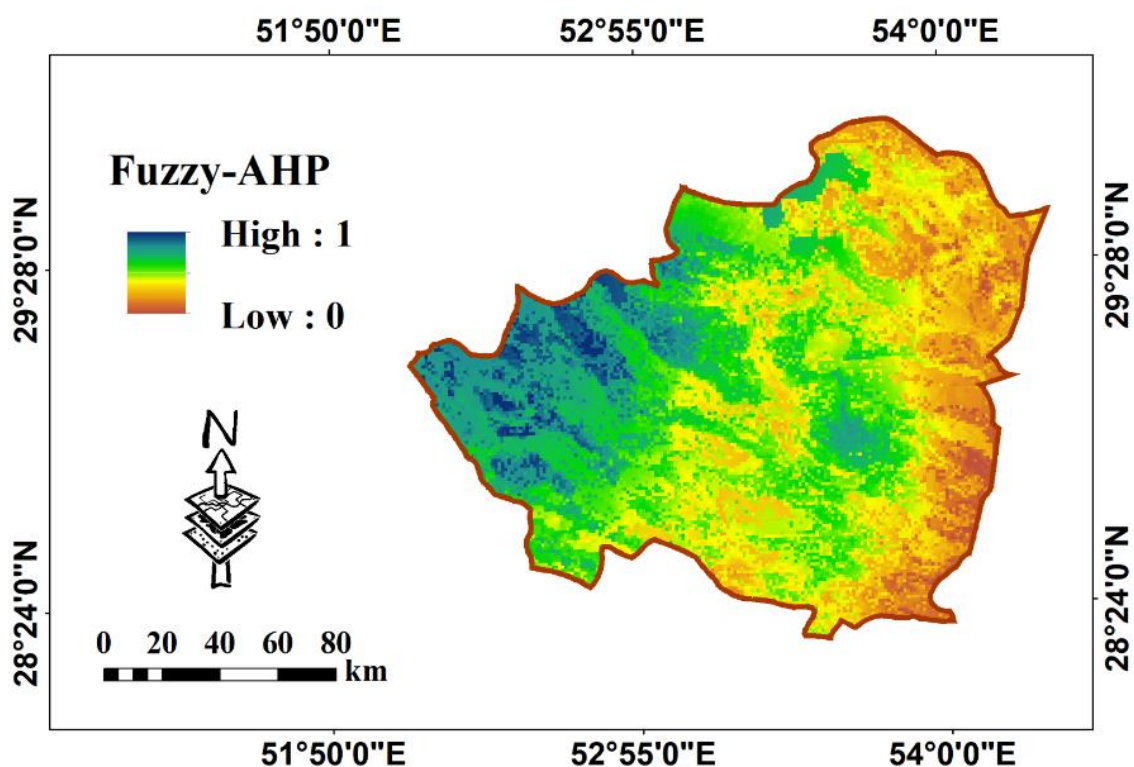
### روش AHP

در ادامه به منظور تهیه نقشه نهایی فازی منطقه مورد مطالعه وزن دهی داده با استفاده از روش AHP انجام شد. با توجه به درجه اهمیتی که هر یک از پارامترها در میزان خشکسالی منطقه مورد مطالعه دارند، وزن هر یک از لایه‌ها مشخص شد. در این مطالعه از نظر کارشناسان بخش منابع طبیعی (۱۵ کارشناس) برای وزن دهی و مقایسه زوجی داده‌ها استفاده شد. نتایج حاصل از وزن دهی به هر یک از لایه‌ها در جدول ۲ آمده است. طبق جدول ۲ مشخص می‌شود که پارامترهای اقلیمی دارای اهمیت بیشتری برای تعیین وضعیت خشکسالی یک منطقه می‌باشند. بنابراین بارندگی و تبخیر و تعرق دارای بیشترین وزن (به ترتیب ۰/۲۸ و ۰/۲) و عمق آب زیرزمینی دارای کمترین وزن و اهمیت می‌باشد (۰/۰۱).

جدول ۲. مقایسه زوجی هر یک از پارامترهای موثر در تعیین خشکسالی منطقه مورد مطالعه (منبع: نگارندگان)

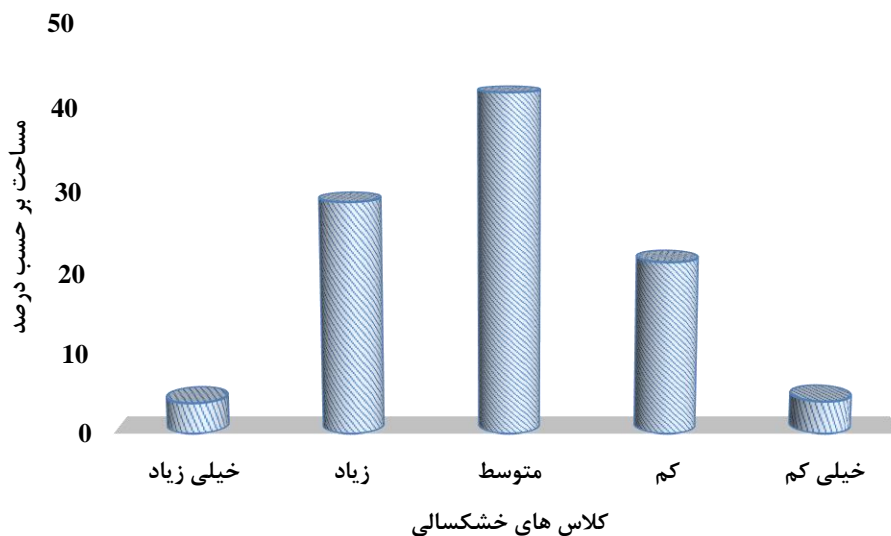
وزن	عمق آب	فاصله از رودخانه	روزهای بارانی	کاربری اراضی	فرسایش	ارتفاع	شیب	شوری خاک	شاخص	بافت خاک	تبخیر	بارندگی	پارامتر
0.28	2	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	بارندگی
0.2	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1		تبخیر
0.15	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1			بافت خاک
0.1	9	8	7	6	5	4	3	2	1				شاخص خشکی
0.1	8	7	6	5	4	3	2	1					شوری خاک
0.08	7	6	5	4	3	2	1						شیب
0.06	6	5	4	3	2	1							ارتفاع
0.04	5	4	3	2	1								فرسایش
0.03	4	3	2	1									کاربری اراضی
0.02	3	2	1										روزهای بارانی
0.02	2	1											فاصله از رودخانه
0.01	1												عمق آب زیرزمینی

در نهایت با استفاده از اطلاعات جدول ۲ وزن دهی به هر یک از لایه‌ها انجام شد و با در نظر گرفتن فرمول ۲ و ۳ نقشه نهایی مناطق مستعد خشکسالی تعیین شد. با توجه به شکل ۶ مشخص می‌شود که نواحی واقع در بخش‌های شرق و شمال شرق و جنوب شرق منطقه مورد مطالعه در وضعیت بحرانی از نظر خشکسالی نسبت به دیگر بخش‌های منطقه واقع شده‌اند.



شکل ۶. نقشه مناطق مستعد خشکسالی با استفاده از روش فازی و AHP (منبع: نگارندگان)

مساحت مربوط به هر یک از کلاس‌های خشکسالی در شکل ۷ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۷ مشخص می‌شود که اکثر منطقه مورد مطالعه در کلاس‌های متوسط تا زیاد (حدود ۷۰ درصد) از نظر خشکسالی قرار دارند.



شکل ۷. مساحت هر یک از کلاس‌های خشکسالی (منبع: نگارندگان)

اطلاعات هواشناسی نشان می‌دهد که در بخش‌های شرقی منطقه که میزان خشکسالی زیاد است، میزان بارندگی کم، ساعات آفتابی زیاد، تبخیر زیاد، میزان روزهای بارانی کم می‌باشد که نشان‌دهنده صحت بالای مدل در تعیین خشکسالی منطقه می‌باشد.

به منظور پشتیبانی از تصمیم‌گیری مکانی تناسب اراضی و تهیه نقش‌های نهایی، یک طرح وزن‌دهی و رتبه‌بندی موثر لازم است (هوکيو<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۸ و ایکرامی و همکاران، ۲۰۱۶). فرایند تحلیلی سلسله‌مراتبی (AHP) تکنیکی قدرتمند است که با تصمیم‌گیری مکانی چند معیاره سروکار دارد (وو و همکاران، ۲۰۱۷). این یک ساختار سلسله‌مراتبی بر اساس مقایسه دو به دو برای ارزیابی معیارها ایجاد می‌کند (ساعتی و وارگاس، ۲۰۱۲ و مالکزیوسکی<sup>۲</sup>، ۱۹۹۲). کارشناسان مربوطه معیارها را در مقایسه دو به دو ارزیابی می‌کنند تا اهمیت نسبی هر معیار را منعکس کنند (ساعتی، ۲۰۱۰).

### روش ژئومورفون

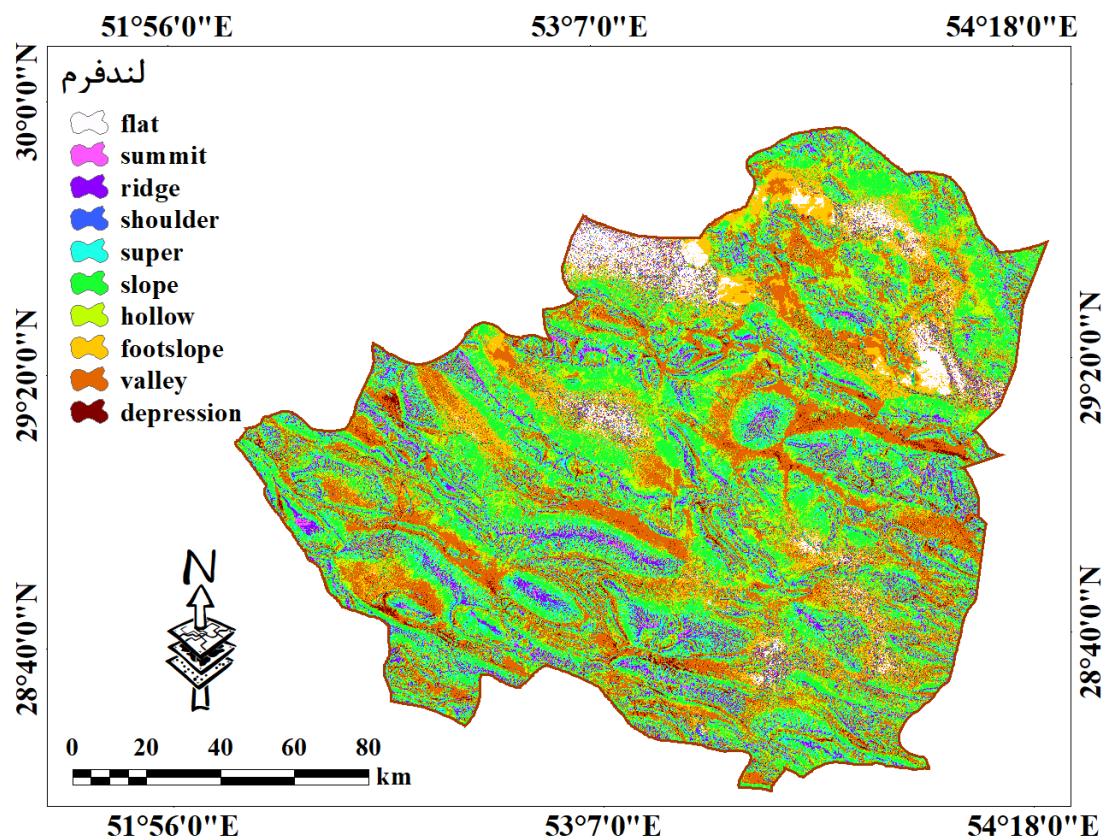
شکل ۸ نقشه لندفرم‌های منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. نقشه‌ای از ۱۰ عنصر رایج در منطقه مورد مطالعه (Flat, summit, ridge, shoulder, super, slope, hollow, footslope, valley) تشکیل شده است (شکل ۹). برای تهیه نقشه لندفرم‌های منطقه مورد مطالعه با استفاده از ژئومورفون‌ها شکل‌گیری زوایای زینت و نادیر در هشت جهت با استفاده از انتقال بین سه عنصر (۱-۰) می‌باشد و الگوی ژئومورفون‌ها از گذر و انتقال بین این ۳ نماد به وجود می‌آید در این ۱۰ نوع ژئومورفون به دست آمده، تعداد کمی انتقال بین عناصر سه‌گانه (۱، ۰، -۱) در الگوهای اتفاق می‌افتد و این نشان‌دهنده درجه نسبتاً بالایی از همبستگی زمین‌حالی است. این الگوها نشان می‌دهند هر چقدر ژئومورفون‌ها شکل پیچیده‌تری داشته باشند میزان انتقال بین سه عنصر بیشتر خواهد بود (جاسویسنز<sup>۳</sup> و استیپینسکی<sup>۴</sup>، ۲۰۱۳).

1. Hoque

2. Malczewski

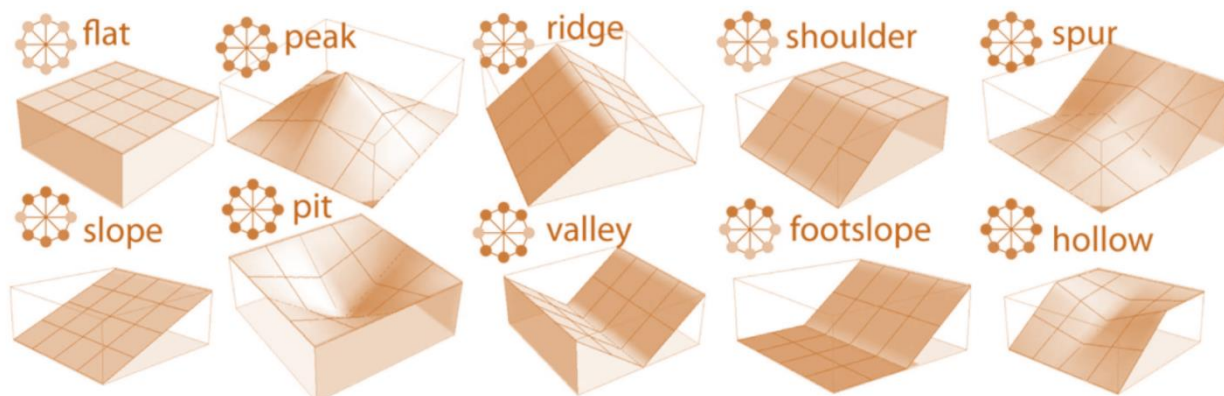
3. Jasiewicz

4. Stepinski



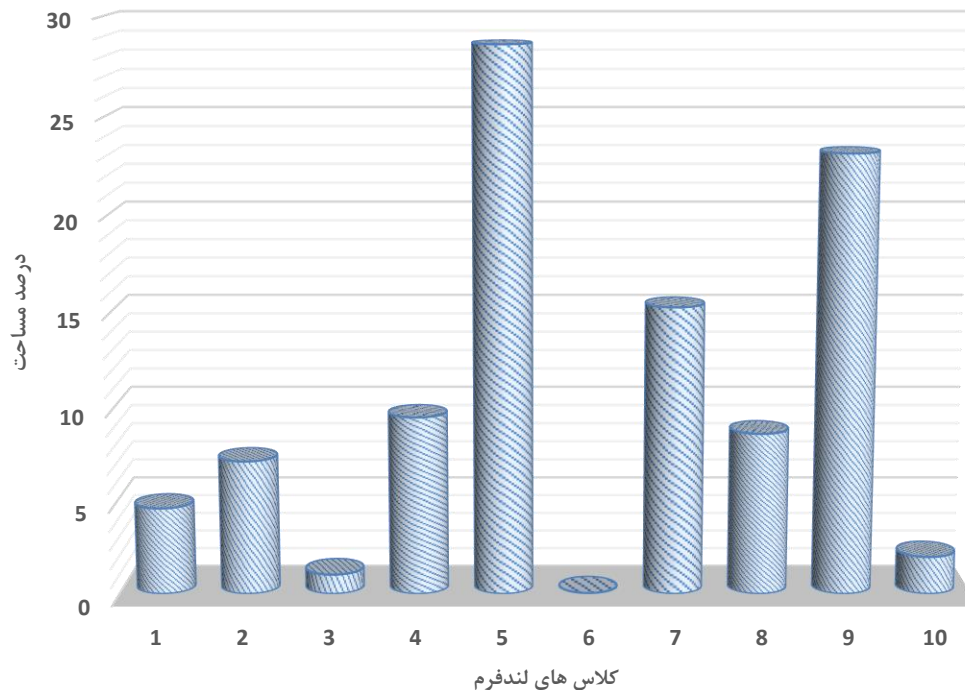
شکل ۸. نقشه ژئومورفولوژی منطقه مورد مطالعه با استفاده از روش ژئومورفون (منبع: نگارندگان)

با توجه به شکل ۸ مشخص می‌شود که شماره ۱ تا ۱۰ به ترتیب نشان دهنده لندفرم های Flat, summit, ridge, shoulder, super, slope, hollow, footslope, valley, depression می باشند. بطوریکه لندفرم نوع slope و super به ترتیب بیشترین و کمترین مساحت منطقه را شامل می‌شود (۲۳٪ و ۰/۰۳٪). همچنین با توجه به شکل ۶ و ۸ مشخص می‌شود که در بخش‌هایی از منطقه که شامل لندفرم Flat است، میزان خشکسالی در کلاس متوسط تا زیاد قرار دارد در حالیکه لندفرم های super دارای میزان خشکسالی کمتر می‌باشد.



شکل ۹. موقعیت هر یک از کلاس‌های لندفرم‌ها با استفاده از روش ژئومورفون (جاسویسز و استیبینسکی، ۲۰۱۳)

مساحت هر یک از لندفرم‌های منطقه مورد مطالعه در شکل ۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۱۰. درصد مساحت هر یک از لندفرم‌های منطقه مورد مطالعه (منبع: نگارندگان)

### نتیجه‌گیری

در این مطالعه هدف تعیین نقشه خشکسالی منطقه با استفاده از داده‌های اقلیمی و هیدرولوژیکی در مناطق جنوبی استان فارس و ارتباط آن با نقشه لندفرم‌های منطقه مورد مطالعه بود. به طوریکه از روش تصمیم‌گیری چند معیاره (fuzzy-AHP) برای تعیین مناطق مستعد خشکسالی استفاده شد. در این روش با استفاده از تابع عضویت فازی نقش‌های فازی برای هر یک از پارامترها تهیه شد. و مقادیر هر یک از پارامترها با توجه به اهمیتی که در خشکسالی دارند بین ۰ تا ۱ قرار داده شد. در ادامه با استفاده از مقایسه دو به دویی هر یک از پارامترها، بر اساس درجه اهمیتی هر یک از آن‌ها دارند، وزن هر یک از پارامترها تعیین و در نهایت نقشه مناطق مستعد خشکسالی برای منطقه مورد مطالعه در محیط GIS تهیه شد. نتایج نشان داد که در بخش شرق و جنوب شرق و همچنین بخش‌های از شمال شرق در طبقات بالای خشکسالی قرار دارند. به طوریکه در حدود ۷۰ درصد منطقه در کلاس‌های متوسط و زیاد خشکسالی قرار دارند که نشان دهنده وضعیت نامناسب منطقه مورد مطالعه از نظر خشکسالی می‌باشد. این مناطق به علت دمای زیاد، روزهای بارانی کم، شاخص خشکی زیاد دارای شرایط خشکسالی بیشتری در منطقه می‌باشند. همچنین لندفرم‌های منطقه از روش ژئومورفون تهیه شد که نوعی از لندفرم‌ها را در منطقه نشان داد. به طوریکه ۱۰ لندفرم در منطقه وجود دارد. به کمک نوع لندفرم‌ها در منطقه می‌توان به فعالیت‌هایی که در گذشته برای تشکیل آن‌ها اتفاق افتاده پی برد. به طوریکه مناطق مرتفع نشان دهنده فرایندهای کوهزایی می‌باشند و از طرفی فرایند فعال در منطقه با توجه به میزان بارندگی می‌تواند فرسایش بوسژه فرسایش آبی باشد. در حالیکه مناطق پست مانند Flat نشان دهنده مناطق با حداکثر رسوبگذاری و مستعد فرسایش بادی هستند. بنابراین با تهیه نقشه‌های لندفرم در منطقه می‌توان به نوع فرایندهایی که در گذشته منجر به ایجاد آن‌ها شده



و نوع فرسایش تاحدودی پی برد. ارتباط بین نوع لندفرم و میزان خشکسالی نشان داد که در بخش‌هایی از منطقه که شامل لندفرم Flat است، میزان خشکسالی در کلاس متوسط تا زیاد قرار دارد در حالیکه لندفرم های super دارای میزان خشکسالی کمتر می‌باشد. بنابراین با استفاده از نقشه لندفرم ها و تعیین نوع لندفرم می توان به میکروکلیمای موجود در این مناطق پی برد و تا حدودی وضعیت میزان تبخیر، خشکی، دما و دیگر پارامترهای موثر در خشکسالی را تخمین زد و به کمک آن میزان خشکسالی در منطقه را پیش بینی نمود.

## منابع

- اکرامی، م.، فاتحی مرچ، ا.، برخورداری، ج.، ۱۳۹۴. ارزیابی آسیب پذیری خشکسالی کشاورزی در اقلیم های خشک و نیمه خشک به کمک GIS و فرایند تحلیل سلسله مراتبی (AHP)؛ مطالعه موردی شهرستان تفت یزد. مهندسی آبیاری و آب ایران. ۲(۵)، ۱۱۷-۱۰۷.
- درویش زاده، م.، حسینی، ر.، ابراهیمی خوسفی، ا.، ۱۳۹۰. پهنه بندی خطر خشکسالی مناطق خشک با استفاده از روشهای دانش مبنا در محیط GIS (مطالعه موردی: حوضه شیپور، یزد). پژوهش های اقلیم شناسی، (۵)، ۱۱۶-۱۰۳
- Aher, S., Shinde, S., Guha, S., and Majumder, M., 2017. Identification of drought in Dhalai river watershed using MCDM and ANN models. *Journal of Earth System Science*, 126(2), 21
- Beyaztas, U., Arikan, B.B., Beyaztas, B.H., Kahya, E., 2018. Construction of prediction intervals for Palmer Drought Severity Index using bootstrap. *J. Hydrol.* 559, 461-470.
- Chakraborty, A., and Joshi, P. K., 2016. Mapping disaster vulnerability in India using analytical hierarchy process. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 7(1), 308-325
- de Azevedo Reis, G., de Souza Filho, F. A., Nelson, D. R., Rocha, R. V., and da Silva, S. M. O., 2020. Development of a drought vulnerability index using MCDM and GIS: study case in São Paulo and Ceará, Brazil. *Natural Hazards*, 104(2), 1781-1799
- Ekrami, M., Marj, A. F., Barkhordari, J., and Dashtakian, K., 2016. Drought vulnerability mapping using AHP method in arid and semiarid areas: a case study for Taft Township, Yazd Province, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 75(12), 1-13
- Ekrami, M., Marj, A.F., Barkhordari, J., and Dashtakian, K., 2016. **Drought vulnerability mapping using AHP method in arid and semiarid areas: a case study for Taft township, Yazd Province, Iran.** *Environ. Earth Sci.*, 75 (12) (2016), p. 1039
- Hao, Z., Hao, F., and Singh, V.P., 2016. A general framework for multivariate multi-index drought prediction based on Multivariate Ensemble Streamflow Prediction (MESP). *J. Hydrol.* 539, 1-10.
- Heim Jr, R.R., 2002. **A review of twentieth-century drought indices used in the United States.** *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 83 (8), pp. 1149-1166
- Hoque, M.A.A., Phinn, S., Roelfsema, C., and Childs, I., 2018. **Assessing tropical cyclone risks using geospatial techniques.** *Appl. Geogr.*, 98, pp. 22-33
- Jasiewicz, J., and Stepinski, T. F., 2013. Geomorphons—a pattern recognition approach to classification and mapping of landforms. *Geomorphology*, 182, 147-156
- Leeper, R.D., Bell, J.E., Vines, C., and Palecki, M., 2016. An evaluation of the North American Regional Reanalysis simulated soil moisture conditions during the 2011 to 2013 drought period. *J. Hydrometeorol.* 18 (2), 515-527.
- Malczewski, J., 1999. **GIS and Multicriteria Decision Analysis.** John Wiley & Sons.
- Malczewski, J., 2010. **Multiple criteria decision analysis and geographic information systems.** M. Ehrgott, J.R. Figueira, S. Greco (Eds.), *Trends in Multiple Criteria Decision Analysis. International Series in Operations Research & Management Science*, Springer US (2010), pp. 369-395
- Martínez-Fernández, J., González-Zamora, A., Sánchez, N., Gumuzzio, A., and Herrero-Jiménez, C.M., 2016. Satellite soil moisture for agricultural drought monitoring: assessment of the SMOS derived Soil Water Deficit Index. *Remote Sens. Environ.* 177, 277-286.
- Mishra, A.K., and Singh, V.P., 2010. A review of drought concepts. *J. Hydrol.* 391 (1-2), 202-216.
- Palchauthuri, M., and Biswas, S., 2016. Application of AHP with GIS in drought risk assessment for Puruliya district, India. *Natural Hazards*, 84(3), 1905-1920
- Quiring, S.M., and Papakryiakou, T.N., 2003. An evaluation of agricultural drought indices for the Canadian prairies. *Agric. For. Meteorol.* 118 (1-2), 49-62.

- Rhee, J., Im, J., and Carbone, G.J., 2010. Monitoring agricultural drought for arid and humid regions using multi-sensor remote sensing data. *Remote Sens. Environ.* 114 (12), 2875–2887.
- Saaty, T.L., and Vargas, L.G., 2012. **Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process.** 175, Springer Science & Business Media.
- Sheffield, J., Goteti, G., Wen, F., and Wood, E. F., 2004. A simulated soil moisture based drought analysis for the United States. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 109(D24)
- Sivakumar, V. L., Krishnappa, R. R., and Nallanathel, M., 2020. Drought vulnerability assessment and mapping using Multi-Criteria decision making (MCDM) and application of Analytic Hierarchy process (AHP) for Namakkal District, Tamilnadu, India. *Materials Today: Proceedings*
- Stepinski, T. F., & Jasiewicz, J. 2011. Geomorphons-a new approach to classification of landforms. *Proceedings of geomorphometry*, 2011, 109-112
- Svoboda, M.D., Fuchs, B.A., Poulsen, C.C., and Nothwehr, J.R., 2015. The drought risk atlas: enhancing decision support for drought risk management in the United States. *J. Hydrol.* 526, 274–286.
- Tonini, F., Lasinio, G.J., and Hochmair, H.H., 2012. Mapping return levels of absolute NDVI variations for the assessment of drought risk in Ethiopia. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 18, 564–572.
- Wang, H., Rogers, J.C., and Munroe, D.K., 2015. Commonly used drought indices as indicators of soil moisture in China. *J. Hydrometeorol.* 16 (3), 1397–1408.
- Wu, H., Qian, H., Chen, J., and Huo, C., **Assessment of agricultural drought vulnerability in the Guanzhong Plain, China.** *Water Resour. Manag.*, 31 (5) (2017), pp. 1557-1574
- Zadeh, L.A., 1996. On Fuzzy Algorithms. *Fuzzy Sets, Fuzzy Logic, and Fuzzy Systems: Selected Papers by Lotfi A Zadeh.* World Scientific, pp. 127–147.
- Zhang, X., Chen, N., Li, J., Chen, Z., and Niyogi, D., 2017. Multi-sensor integrated framework and index for agricultural drought monitoring. *Remote Sens. Environ.* 188, 141–163.

