



Sharjah, United Arab Emirates, March 2024, Photographer: Hassan Pasha

مدل سازی زیستگاه‌های بالقوه افعی جعفری (*Echis carinatus*) در ایران تحت تأثیر تغییرات آب و هوایی

صبا شکرالهی

دانشجوی کارشناسی علوم و مهندسی محیط‌زیست، گروه محیط‌زیست طبیعی، دانشکده منابع طبیعی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه

تهران، کرج، ایران

رایانامه نویسنده: saba.shokrollahi@ut.ac.ir

چکیده

افعی جعفری (*Echis carinatus*) یکی از گونه‌های مهم خانواده افعی‌ها (Viperidae) در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران به‌شمار می‌رود و به‌دلیل نقش زیست‌محیطی، رفتارهای شکارچیان و پراکنش گسترده‌اش مورد توجه است. هدف این مطالعه، ارزیابی زیستگاه بالقوه این گونه با استفاده از مدل مکسنت (MaxEnt) بود. برای این منظور، داده‌های حضور گونه و ۱۹ متغیر محیطی مرتبط گردآوری و از طریق تحلیل مؤلفه‌های اصلی، هشت متغیر کلیدی انتخاب شد. نتایج مدل‌سازی نشان داد که دما، بارش و ارتفاع از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر توزیع افعی جعفری هستند. مقدار شاخص AUC برابر با ۰/۸۸۲ نشان‌دهنده دقت بالای مدل است. بر اساس نقشه‌های حاصل، بخش‌هایی از جنوب، جنوب‌غرب و فلات مرکزی ایران، به‌ویژه استان‌های کرمان، فارس و بوشهر، دارای زیستگاه‌های مطلوب‌تری برای این گونه هستند. این یافته‌ها می‌توانند در مدیریت مؤثرتر، برنامه‌ریزی حفاظتی و مقابله با تهدیداتی همچون تغییرات اقلیمی و تخریب زیستگاه نقش داشته باشند. بهره‌گیری از مدل مکسنت به‌عنوان ابزاری قدرتمند، امکان پیش‌بینی دقیق‌تری از پراکنش گونه‌ها را فراهم می‌سازد و به حفاظت از تنوع زیستی در مناطق آسیب‌پذیر ایران کمک می‌کند.

کلیدواژه‌ها: افعی جعفری، مدل مکسنت، مطلوبیت زیستگاه، تغییرات اقلیمی، اکوسیستم‌های خاورمیانه

مقدمه

داده‌های حضوری، عملکرد برتری را نشان داده‌است (Ahmadi et al., 2023).

افعی جعفری (*Echis carinatus*) یکی از گونه‌های مهم و شایع در خانواده افعی‌ها (Viperidae) است که در مناطق خشک و نیمه‌خشک خاورمیانه، از جمله ایران، زندگی می‌کند. این گونه به دلیل ویژگی‌های زیستی خاص و رفتارهای شکارچیان‌اش، نقش کلیدی در اکوسیستم‌های محلی ایفا می‌کند. افعی جعفری به‌طور عمده در مناطق بیابانی و نیمه‌بیابانی زندگی می‌کند و به‌عنوان یک شکارچی مؤثر در کنترل جمعیت جوندگان و دیگر موجودات کوچک عمل می‌کند. این گونه به دلیل قدرت زهر و رفتارهای مخفی کارانه‌اش، می‌تواند تهدیدی برای انسان‌ها و سایر جانوران باشد (McDiarmid et al., 1999).

زیستگاه افعی جعفری به‌طور عمده شامل مناطق خشک، تپه‌های شنی و سنگی و نواحی با پوشش گیاهی کم است. این گونه به‌خوبی با شرایط سخت زیستگاهی سازگار شده و می‌تواند در دماهای بالا و کم‌آبی زنده بماند. در این راستا، شناخت عوامل محیطی مؤثر بر توزیع و مطلوبیت زیستگاه این گونه اهمیت ویژه‌ای دارد؛ زیرا تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی می‌توانند به تخریب زیستگاه‌ها و کاهش جمعیت این گونه منجر شوند (Phillips et al., 2006).

مدل مکسنت (MaxEnt) یکی از ابزارهای پیشرفته برای ارزیابی مطلوبیت زیستگاه و پیش‌بینی توزیع گونه‌ها براساس داده‌های حضور و عوامل محیطی است (Guisan & Thuiller, 2005). این مدل با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین، می‌تواند به شناسایی مناطق مناسب برای گونه‌های خاص کمک کند. مدل مکسنت به‌ویژه در مواردی که داده‌های حضور محدود است، بسیار مؤثر عمل می‌کند و به پژوهشگران این امکان را می‌دهد که با استفاده از داده‌های محیطی، توزیع جغرافیایی گونه‌ها را

تغییرات اقلیمی و گرمایش کره زمین به‌عنوان یکی از مهم‌ترین تهدیدات بر تنوع زیستی، تولیدات کشاورزی و امنیت غذایی در مقیاس جهانی معرفی شده‌است (Fan et al., 2022). مطالعات اخیر توسط متخصصان نشان داده‌است که اثرات تغییرات اقلیمی بر گونه‌های گیاهی و جانوری پیچیده و احتمالاً بیش از مقادیر پیش‌بینی شده‌است. در دهه‌های اخیر، تغییرات اقلیمی به‌سرعت زیستگاه بسیاری از گونه‌های حساس را تغییر داده و منجر به نابودی جمعیت‌های بسیاری از گونه‌های حساس شده‌است (Del Río et al., 2021).

مطالعات متعدد در خصوص جانوران و گیاهان نشان داده‌است که با تغییر شرایط آب و هوایی، توزیع بالقوه گونه‌ها نیز تغییر می‌کند. لذا در واکنش به تغییر شرایط آب و هوایی برخی گونه‌های جانوری اقدام به مهاجرت و یا تغییر زیستگاه می‌کنند (برای مثال Yousefi et al., 2015). از این‌رو، پیش‌بینی تأثیر تغییرات اقلیمی بر تغییرات پراکنش تاریخی و تکاملی گونه‌های جانوری، به‌ویژه گونه‌هایی که حضورشان در کنار انسان می‌تواند منجر به تقابل و یا خطر مرگ برای انسان شود (از جمله مارهای زهرآگین)، بسیار مهم است.

در طی دهه اخیر روش‌های مدل‌سازی متعددی برای بررسی الگوهای توزیع گونه‌ها براساس سناریوهای گرمایش جهانی توسعه داده شده‌است. در این میان مدل‌های توزیع گونه‌ها ($SDMs^1$)، که قادر به تخمین توزیع گونه‌ها در گذشته، حال و آینده هستند، به‌طور گسترده برای بررسی تأثیرات تغییر آب و هوایی بر توزیع گونه‌ها و ارزیابی مناسب بودن زیستگاه توسعه یافته‌اند. از این میان، مدل ماکزیمم آنترپی (MaxEnt)، در مقایسه با سایر مدل‌ها در هنگام برخورد با حجم نمونه محدود و

¹ Specie Distribution Models

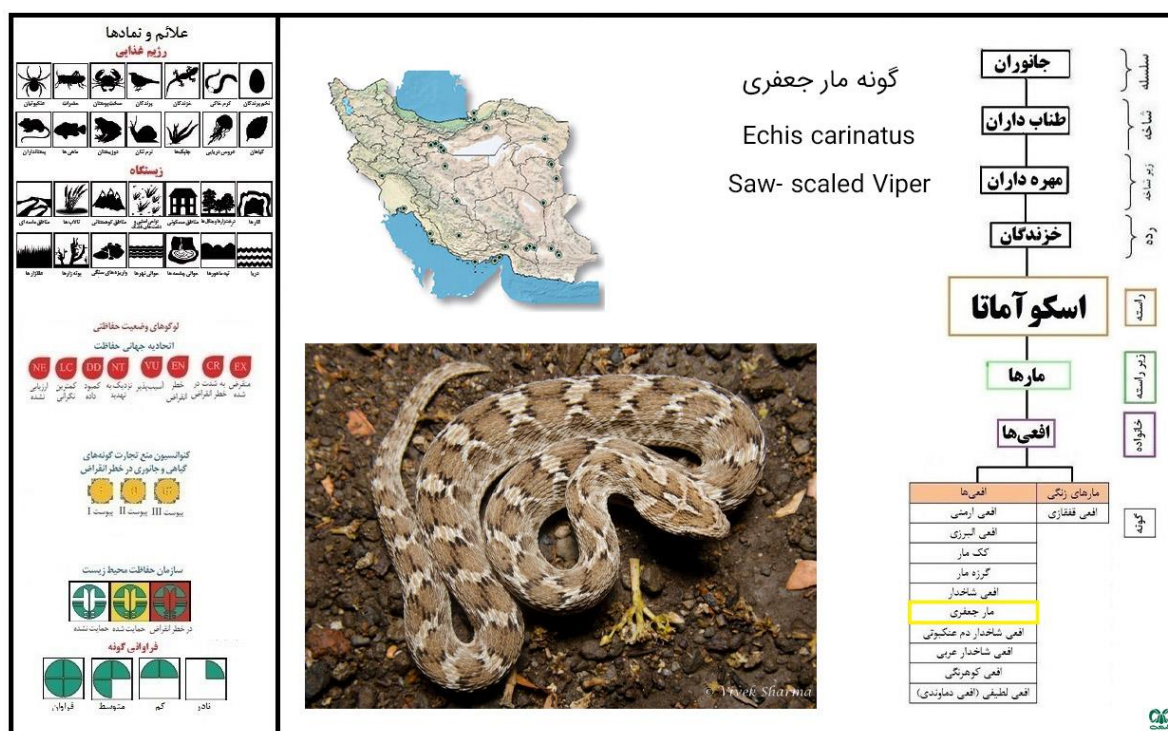
هرگز بزرگتر از حدود ۹۰ سانتی‌متر در طول نخواهد بود. آن‌ها دارای سری کوتاه، پهن و گلابی شکل هستند که به وضوح از گردن جدا شده است. پوزه آن‌ها کوتاه و گرد بوده و چشم‌های به نسبت بزرگ و برآمده‌ای دارند. فرق سر این مارها با پولک‌های کوچک، نامنظم و نیمه‌پوشیده شده که می‌تواند صاف یا پوشانده شده باشد. بدن افعی جعفری نسبتاً بلند و باریک و استوانه‌ای شکل است. فلس‌های پشتی عمدتاً پولک‌دار و زورقی شکل هستند. با این حال، پولک‌ها در جناح پایینی در یک زاویه ۴۵ درجه متمایز و مرکزی بیرون آمده‌اند و دندان‌دار هستند. دم این گونه نیز کوتاه است (موسسه آموزش و تحقیقات جهانگردی طبیعت).

پیش‌بینی کنند. با توجه به اهمیت افعی جعفری در اکوسیستم‌های ایران و تهدیدات موجود، استفاده از مدل مکسنت برای ارزیابی مطلوبیت زیستگاه این گونه می‌تواند به بهبود مدیریت و حفاظت از آن کمک کند (Elith et al., 2011).

مواد و روش‌ها

گونه مورد مطالعه

افعی جعفری (*Echis carinatus*) (شکل ۱) یکی از گونه‌های شناخته‌شده و مهم در خانواده افعی‌ها (Viperidae) است که به‌طور عمده در مناطق خشک و نیمه‌خشک خاورمیانه و جنوب آسیا زندگی می‌کند. این مارها از نظر اندازه نسبتاً کوچک هستند و بزرگسالان آن‌ها



شکل ۱- رده‌بندی و مشخصات افعی جعفری (*Echis carinatus*) (موسسه آموزش و تحقیقات جهانگردی طبیعت)

جعفری، مشابه آن‌هایی که در آفریقا یافت می‌شوند، تخم‌گذار هستند، با این وجود افعی جعفری که در این یافت می‌شود زنده‌زا است (Daniels, 2002).

عادت غذایی افعی جعفری متنوع است و می‌تواند شامل ملخ‌ها، سوسک‌ها، کرم‌ها، حلزون‌ها، عنکبوت‌ها، عقرب‌ها، هزارپا، قورباغه‌ها، وزغ‌ها، خزندگان (از جمله مارهای دیگر)، پستانداران و پرندگان کوچک باشد. بیشتر گونه‌های افعی

براساس ارزیابی‌های IUCN¹، افعی جعفری در رده "LC²" قرار دارد (IUCN Red List, 2016). این وضعیت نشان‌دهنده پایداری جمعیت این گونه در مناطق طبیعی خود است.

منطقه مورد مطالعه

این پژوهش در محدوده جغرافیایی ایران انجام و برای تحلیل و مدل‌سازی زیستگاه، از ۴۸ نقطه حضور گونه‌های مورد مطالعه استفاده شده‌است. این نقاط به‌منظور جمع‌آوری داده‌های اکولوژیکی و جغرافیایی از سایت GBIF³ استخراج شده‌اند.

نرم‌افزارهای مورد استفاده

در این مطالعه، برای تحلیل داده‌ها و مدل‌سازی زیستگاه، از نرم‌افزارهای R Studio و ArcGIS 10.8 استفاده شد. این نرم‌افزارها ابزارهای پیشرفته‌ای برای تجزیه و تحلیل داده‌های اکولوژیکی و جغرافیایی ارائه می‌دهند و به محققان کمک می‌کنند تا نتایج دقیقی از داده‌های جمع‌آوری شده به‌دست آورند.

۱. **R Studio**: این نرم‌افزار به‌عنوان محیط توسعه یکپارچه^۴ (IDE) برای زبان برنامه‌نویسی R استفاده می‌شود. R Studio امکان نوشتن، ویرایش و اجرای کدهای R را به‌طور مؤثر فراهم می‌کند و ابزارهای متنوعی برای تجزیه و تحلیل داده‌ها ارائه می‌دهد.

۲. **ArcGIS 10.8**: این نرم‌افزار برای تجزیه و تحلیل مکانی و مدیریت داده‌های جغرافیایی به‌کار می‌رود. ArcGIS به محققان

این امکان را می‌دهد که نقشه‌های زیستگاه و توزیع جغرافیایی گونه‌ها را ایجاد و تحلیل کنند. در R Studio، بسته‌های زیر نصب و استفاده شدند:

- **raster**: برای کار با داده‌های رستری و تحلیل‌های مکانی؛
- **dismo**: برای مدل‌سازی توزیع گونه‌ها و پیش‌بینی زیستگاه‌ها؛
- **sp**: برای کار با داده‌های فضایی و تحلیل‌های جغرافیایی؛
- **ENMeval**: برای ارزیابی و انتخاب بهترین مدل‌های اکولوژیکی؛
- **rJava**: برای استفاده از قابلیت‌های جاوا در R؛
- **magrittr**: برای تسهیل در نوشتن کدهای R با استفاده از عملگرهای خطی؛
- **sf**: برای کار با داده‌های فضایی و تجزیه و تحلیل‌های جغرافیایی؛
- **devtools**: برای نصب و توسعه بسته‌های جدید R از منابع مختلف.

متغیرهای مورد استفاده برای ساخت مدل مطلوبیت زیستگاه

برای ساخت مدل مطلوبیت زیستگاه، ابتدا از ۱۹ متغیر Bioclimatic (<https://www.worldclim.org/data/bioclim.html>) استفاده شد که اطلاعات مهمی درباره شرایط اقلیمی و محیط‌زیستی فراهم می‌کنند. به‌منظور حذف همبستگی بین داده‌ها، تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA^۵) روی این ۱۹ متغیر انجام شد. در این تحلیل، ماتریس همبستگی بین

¹ International Union for Conservation of Nature

² Least concern

³ Global Biodiversity Information Facility

⁴ Integrated Development Environment

⁵ Principal Component Analysis

مرتبط، هشت متغیر آب و هوایی به‌عنوان متغیرهای اصلی انتخاب شدند (جدول ۱).

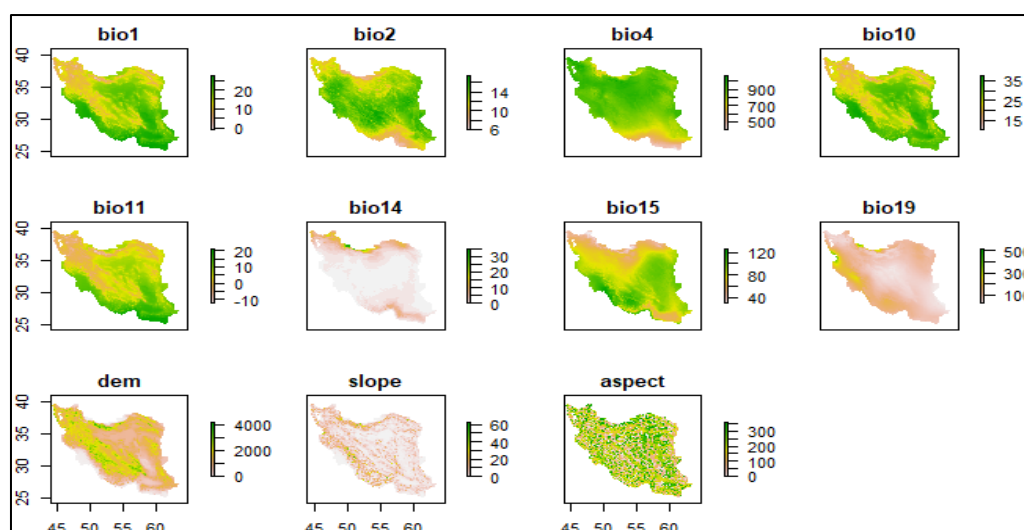
متغیرهای آب و هوایی بررسی و لایه‌هایی که همپوشانی آن‌ها زیر ۷۰ درصد بود، شناسایی شدند. در نهایت براساس نتایج حاصل از ماتریس همبستگی و پیشینه پژوهش‌های

جدول ۱- متغیرهای اصلی آب و هوایی

کد متغیر	نام متغیر	توضیح مختصر
BIO1	دمای سالانه	میانگین دمای سالانه بر حسب درجه سلسیوس
BIO2	دامنه دما	تفاوت میانگین دمای گرم‌ترین و سردترین ماه
BIO4	دمای گرم‌ترین ماه سال	میانگین دمای گرم‌ترین ماه سال
BIO10	بارش در خشک‌ترین فصل	مجموع بارش در خشک‌ترین فصل سال (میلی‌متر)
BIO11	بارش در مرطوب‌ترین فصل	مجموع بارش در مرطوب‌ترین فصل سال
BIO14	بارش سالانه	مجموع بارش سالانه
BIO15	بارش در مرطوب‌ترین ماه	مجموع بارش در مرطوب‌ترین ماه سال
BIO19	بارش در گرم‌ترین فصل	مجموع بارش در گرم‌ترین فصل سال

استفاده از این متغیرها به محققان این امکان را می‌دهد که عوامل مؤثر بر زیستگاه گونه‌ها را به‌طور دقیق‌تری بررسی کرده و مدل‌های مطلوبیت زیستگاه را با دقت بیشتری توسعه دهند. این مدل‌ها می‌توانند به شناسایی مناطق با پتانسیل بالای زیستگاه و همچنین ارزیابی تهدیدات محیطی کمک کنند (یوسفی و همکاران، ۱۴۰۲).

برای ساخت مدل مطلوبیت زیستگاه در این پژوهش، از مجموعه‌ای از متغیرهای محیطی و جغرافیایی استفاده شده‌است. این متغیرها به‌طور خاص برای تحلیل تأثیرات مختلف بر توزیع گونه‌ها انتخاب شده‌اند و شامل دما، دامنه دما، بارش، ارتفاع و شیب است (علی طاوولی و همکاران، ۱۴۰۳). جزییات متغیرها در ادامه در شکل ۲ توضیح داده شده‌است



شکل ۲- نقشه متغیرهای محیطی و توپوگرافی

مراحل کار با نرم‌افزار و کدنویسی‌ها

در این بخش، مراحل کار با نرم‌افزار ArcGIS و R به منظور مدل‌سازی مطلوبیت زیستگاه و تحلیل داده‌ها به صورت گام به گام توضیح داده شده است.

۱- تبدیل لایه‌های محیطی به فرمت ASCII

ابتدا لایه‌های رستری محیطی (مانند دما، بارش و سایر متغیرها) در نرم‌افزار ArcGIS از حالت رستر به فرمت ASCII تبدیل شدند. این کار به منظور آماده‌سازی داده‌ها برای وارد کردن به R انجام می‌شود.

۲- نصب و بارگذاری بسته‌های مورد نیاز در R

در ابتدا بسته‌های لازم برای تحلیل داده‌ها نصب و بارگذاری می‌شوند. برای این کار از کد زیر استفاده شد:

```
install.packages(c("raster", "dismo", "sp",
"ENMeval", "rJava", "magrittr", "sf",
"devtools"))
```

سپس با استفاده از library بسته‌های مورد نیاز بارگذاری شد:

```
library(sf); library(magrittr); library(sp);
library(raster); library(dismo); library(rJava);
library(base); library(ENMeval)
```

۳- بارگذاری و پردازش داده‌ها

لایه‌های محیطی و داده‌های دیگر بارگذاری شدند. این لایه‌ها شامل داده‌های اقلیمی و جغرافیایی بودند که برای مدل‌سازی استفاده می‌شوند:

```
bio_layers <- list(bio1, bio2, bio4, bio10,
bio11, bio14, bio15, bio19)
```

```
data <- list(dem, humanfootprint, aspect)
```

```
alldata <- list(bio1, bio2, bio4, bio10, bio11,
bio14, bio15, bio19, dem, slope, aspect)
```

```
alldata_stack <- stack(alldata)
```

۴- بارگذاری داده‌های حضور و تعیین مختصات

داده‌های حضور گونه (*Echiscarinatus*) از فایل CSV خوانده شد و مختصات آن تعیین گردید:

```
Echiscarinatus <- read.csv("echisdata.csv")
```

```
coordinates(Echiscarinatus) <- ~x + y
```

۵- تعیین سیستم مختصات

سیستم مختصات برای داده‌های حضور تنظیم شد:

```
myCRS1 <- CRS("+init=epsg:4326")
```

```
crs(Echiscarinatus) <- myCRS1
```

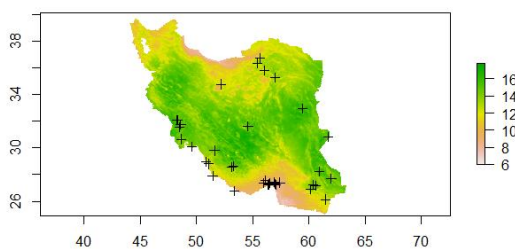
۶- ترسیم داده‌های حضور و لایه‌های محیطی

داده‌های حضور و لایه‌های محیطی ترسیم شدند (شکل ۳):

```
plot(Echiscarinatus)
```

```
plot(bio2)
```

```
plot(Echiscarinatus, add=TRUE)
```



شکل ۳- داده‌های حضور بر روی لایه‌ی محیطی

۷- بارگذاری و پردازش شکل‌نما

شکل‌نما (shapefile) کشور ایران بارگذاری و سیستم مختصات آن بررسی شد:

```
countryshape <- shapefile("iran.shp")
```

```
study.area <- countryshape
```

```
plot(study.area)
```

۸- تبدیل سیستم مختصات و برش منطقه مطالعه

سیستم مختصات منطقه مطالعه به مختصات داده‌های حضور تبدیل شده و سپس داده‌ها برش داده شدند:

```
study.area <- spTransform(study.area,
crs(Echiscarinatus))
```

```
study.area <- spTransform(study.area,
(alldata_stack))
```

```
set.seed(1)
```

```
studyArea <- crop(alldata_stack,
extent(study.area))
```

```
StudyArea <- mask(studyArea, study.area)
```

۹- نمونه‌برداری از پس‌زمینه

نمونه‌برداری از نقاط پس‌زمینه برای تحلیل انجام شد. این مرحله به منظور ایجاد نقاط پس‌زمینه برای مدل‌سازی انجام شد (شکل ۴):

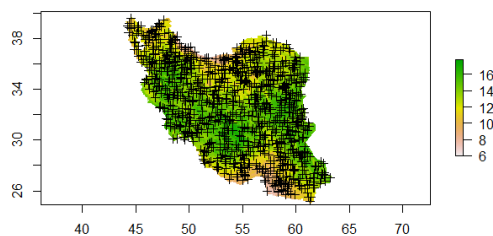
```
study.area_sf <- st_as_sf(study.area)
```

```
bg <- st_sample(study.area_sf, size = 1000)
```

```
plot(bg, add=T)
```

```
BG <- sampleRandom(x=StudyArea, size =
1000, na.rm=T, sp=1)
```

```
plot(BG, add=T)
```



شکل ۴- نقشه نمونه‌برداری از نقاط پس‌زمینه

۱۰- تقسیم داده‌ها به مجموعه‌های آموزشی و آزمایشی

در این مرحله، داده‌های حضور به دو مجموعه آموزشی و آزمایشی تقسیم شدند. این کار به منظور ارزیابی عملکرد مدل انجام شد. ابتدا یک نمونه تصادفی از داده‌های حضور انتخاب شده و ۷۰ درصد آن به عنوان داده‌های آموزشی و ۳۰ درصد به عنوان داده‌های آزمایشی در نظر گرفته شدند (شکل ۵):

```
select <- sample(1:nrow(Echiscarinatus),
nrow(Echiscarinatus)*0.7)
```

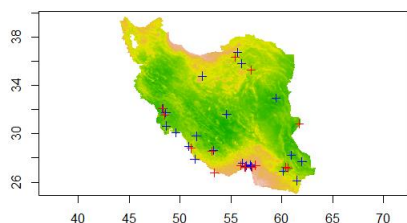
```
EchiscarinatusTrain <- Echiscarinatus[select,]
```

```
EchiscarinatusTest <- Echiscarinatus[-select,]
```

سپس این دو مجموعه با رنگ‌های مختلف روی نقشه ترسیم شده تا تفکیک آن‌ها مشخص باشد:

```
plot(EchiscarinatusTrain, add=1, col="blue")
```

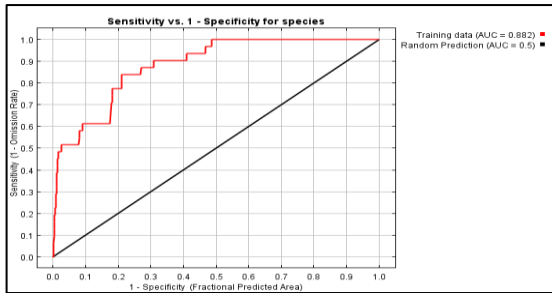
```
plot(EchiscarinatusTest, add=1, col="red")
```



شکل ۵- نقشه داده‌های آموزشی و آزمایشی

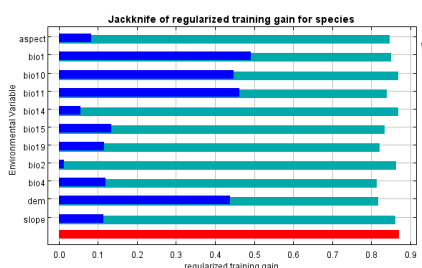
۱۱- استخراج داده‌ها از لایه‌های محیطی

در این مرحله، داده‌ها از لایه‌های محیطی برای مجموعه‌های آموزشی و آزمایشی استخراج شدند. این کار به منظور ایجاد یک دیتافریم که شامل ویژگی‌های محیطی نقاط حضور و نقاط پس‌زمینه باشد، انجام شد. ابتدا ویژگی‌های محیطی برای مجموعه آموزشی استخراج شدند:



شکل ۶- نمودار ROC

نمودار آزمون جک‌نایف (Jackknife) (شکل ۷) که از مدل‌های پیش‌بینی زیستگاه به دست می‌آید، ابزاری کارآمد برای ارزیابی اهمیت متغیرهای مختلف در مدل‌سازی است. در این نمودار، با حذف تدریجی هر یک از متغیرها و مشاهده تغییرات در عملکرد مدل، می‌توان تعیین کرد که کدام متغیرها بیشترین تأثیر را بر پیش‌بینی دارند (علی طاولی و همکاران، ۱۴۰۳). تحلیل جک‌نایف نشان داد که متغیرهای **bio1** (دمای میانگین سالانه)، **bio11** (بارش در سردترین فصل) و **dem** (ارتفاع) بیشترین تأثیر را بر مدل مطلوبیت زیستگاه دارند. این به این معناست که تغییرات در این متغیرها می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر توزیع و فراوانی گونه‌ها داشته باشد.



شکل ۷- نمودار جک‌نایف

منحنی‌های زیر (شکل ۸) نشان می‌دهند که هر متغیر محیطی چگونه بر پیش‌بینی Maxent تأثیر می‌گذارد. منحنی‌ها نشان می‌دهند که چگونه احتمال پیش‌بینی حضور تغییر می‌کند وقتی که هر متغیر محیطی تغییر می‌کند و سایر متغیرهای محیطی در مقدار میانگین نمونه خود نگه داشته می‌شوند. روی یک منحنی پاسخ کلیک کنید تا نسخه بزرگ‌تری از آن را ببینید. توجه داشته باشید

```
p <- extract(alldata_stack,
EchiscarinatusTrain)
```

```
pctest <- extract(alldata_stack,
EchiscarinatusTest)
```

```
a <- extract(alldata_stack, BG)
```

سپس یک وکتور برای شناسایی کلاس‌ها (حضور و عدم حضور) ایجاد شد. در اینجا، نقاط حضور با مقدار ۱ و نقاط پس‌زمینه با مقدار ۰ مشخص شدند:

```
pa <- c(rep(1, nrow(p)), rep(0, nrow(a)))
```

در نهایت، داده‌های استخراج‌شده به یک دیتافریم ترکیب شده که برای مدل‌سازی استفاده خواهد شد:

```
pder <- as.data.frame(rbind(p, a))
```

۱۲- مدل‌سازی با استفاده از الگوریتم MaxEnt

مدل‌سازی با استفاده از الگوریتم MaxEnt انجام شد. این الگوریتم به منظور پیش‌بینی توزیع مناسب زیستگاه براساس داده‌های موجود استفاده شد:

```
mod <- dismo::maxent(x=pder, p=pa,
path="E:/modelingdata/Echiscarinatus",
args=c("responsecurves", "jackknife=TRUE"))
```

۱۳- پیش‌بینی و ترسیم نقشه‌های مطلوبیت

در نهایت، پیش‌بینی مطلوبیت زیستگاه و ترسیم نقشه‌های حاصل انجام شد:

```
currentmap <- predict(mod, alldata_stack)
```

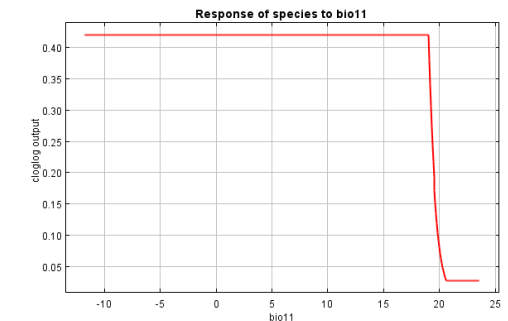
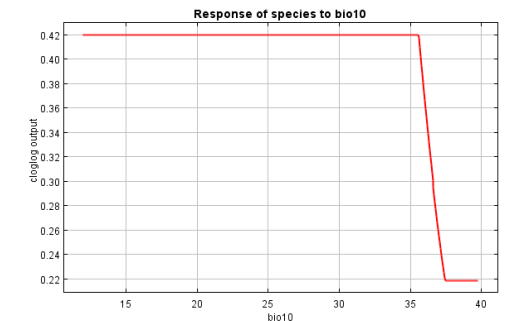
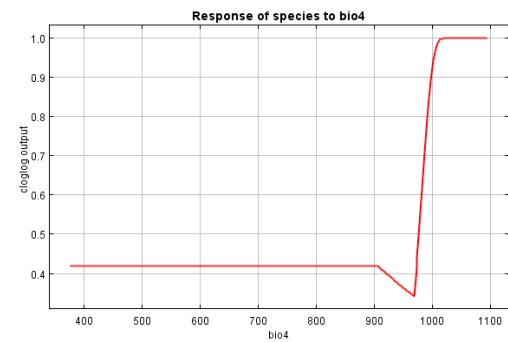
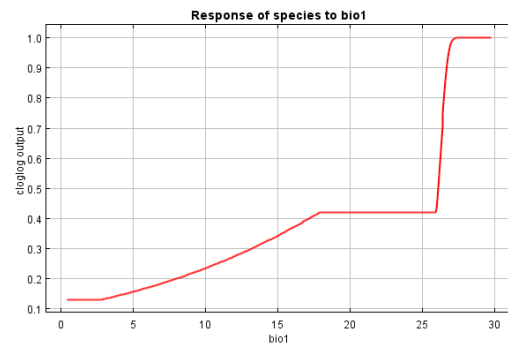
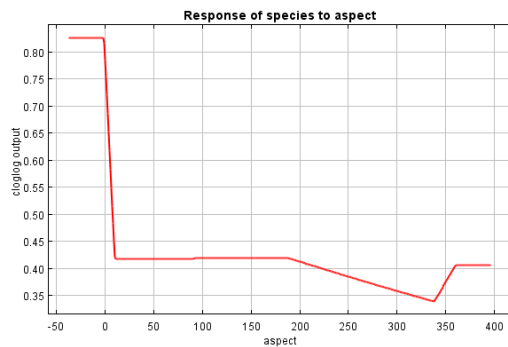
```
plot(currentmap)
```

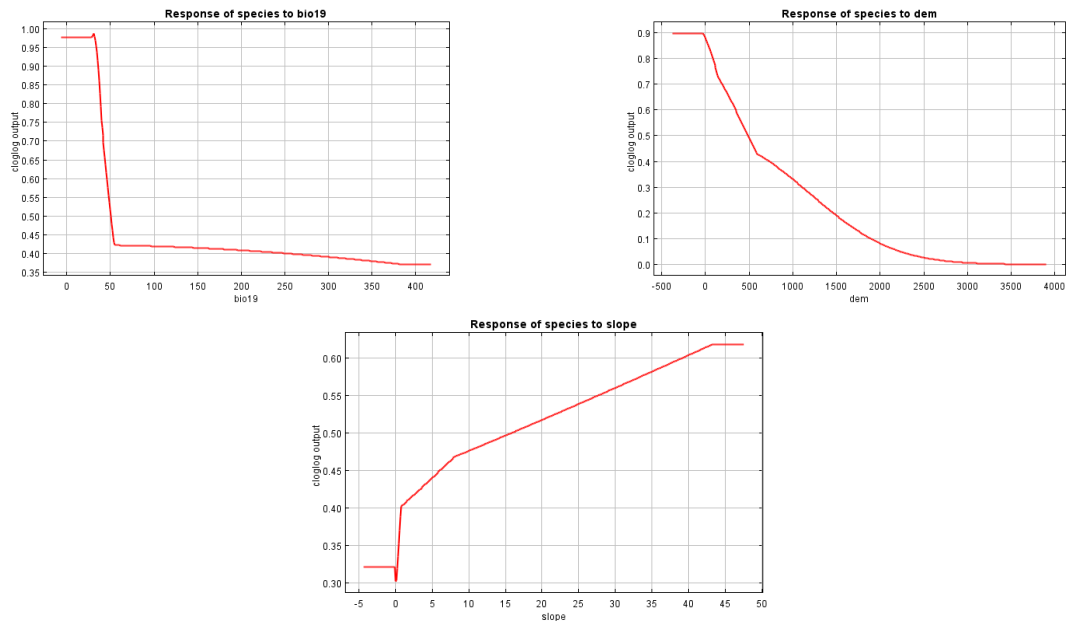
نتایج

با توجه به نمودار ROC (شکل ۶) در این پژوهش مقدار شاخص $AUC = 0.882$ است. این عدد نشان دهنده توانایی بالا و مناسب مدل در پیش‌بینی پراکنش گونه‌ی افعی جعفری است.

حاشیه‌ای تغییر دقیقاً یک متغیر را نشان می‌دهند، در حالی که مدل ممکن است از مجموعه‌ای از متغیرها که به‌طور همزمان تغییر می‌کنند، بهره‌برداری کند (حیدرپور و همکاران، ۱۴۰۰).

که این منحنی‌ها ممکن است دشوار به تفسیر باشند اگر متغیرهای همبسته قوی داشته باشید؛ زیرا مدل ممکن است به همبستگی‌ها به گونه‌ای وابسته باشد که در منحنی‌ها واضح نباشد. به عبارت دیگر، این منحنی‌ها اثر

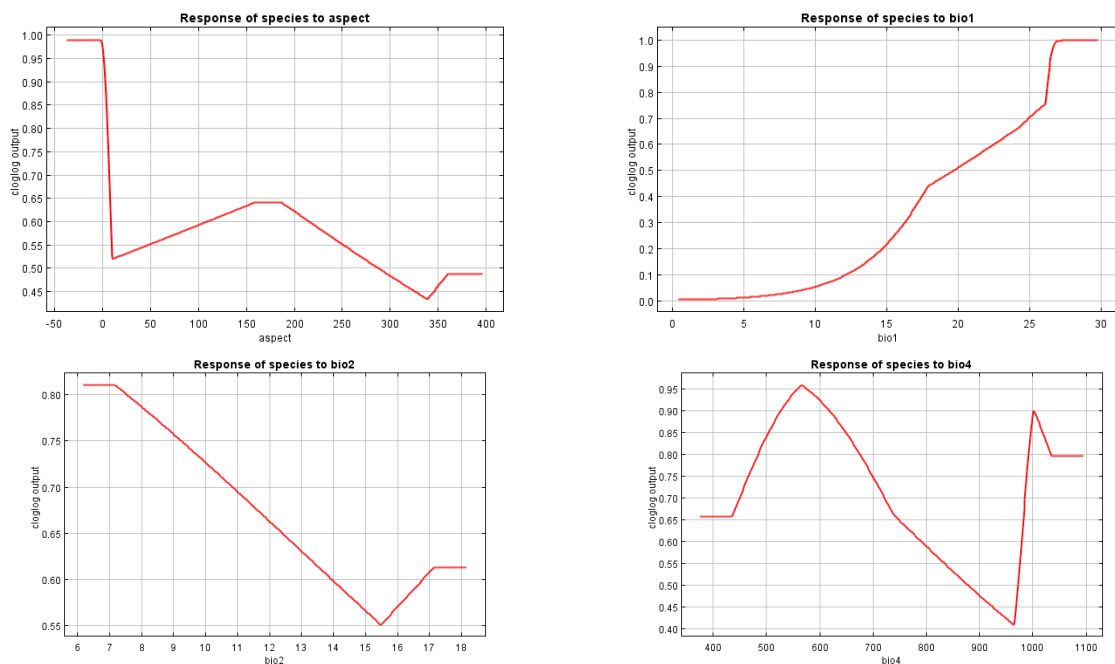


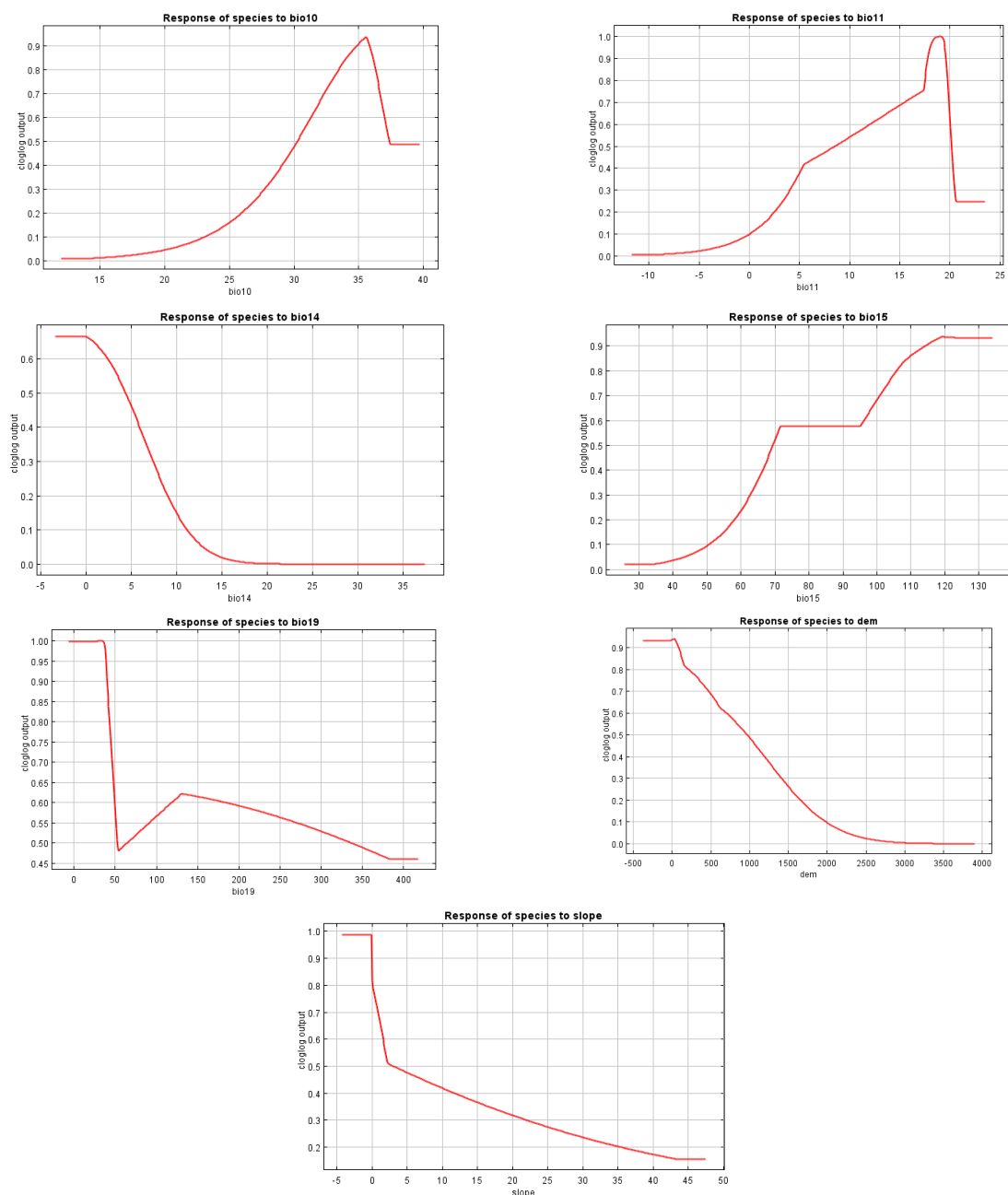


شکل ۸- نمایش رفتار ۱۳ متغیر محیطی در صورت ثابت بودن سایر متغیرها

هم به وابستگی‌هایی که به واسطه همبستگی بین متغیر انتخاب شده و سایر متغیرها ایجاد شده‌اند، نشان می‌دهند. اگر بین متغیرها همبستگی‌های قوی وجود داشته باشد، تفسیر این نمودارها ممکن است آسان‌تر باشد (وارسته مرادی، ۱۳۹۲).

بر خلاف منحنی‌های پاسخ حاشیه‌ای فوق، هر یک از منحنی‌های زیر (شکل ۹) نمایانگر یک مدل متفاوت هستند، به عبارتی، یک مدل Maxent که تنها با استفاده از متغیر مربوطه ایجاد شده‌است. این نمودارها وابستگی مناسب بودن پیش‌بینی شده را هم به متغیر انتخاب شده و



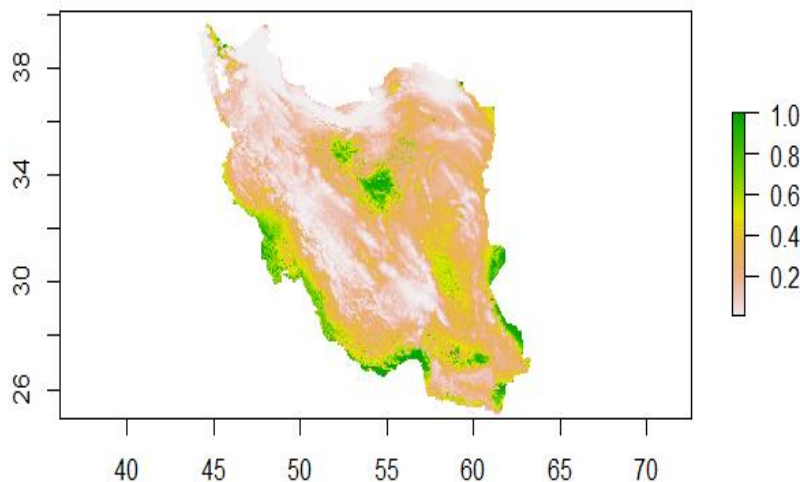


شکل ۹- منحنی مدل‌های مکسنت تحت تاثیر یک متغیر محیطی

برخوردار هستند. مشاهده می‌شود مناطق جنوبی و جنوب غربی کشور و همچنین بخشی از فلات مرکزی از مطلوبیت بیشتر برای این گونه برخوردار است (شکل ۱۰).

خروجی مدل

در نهایت با گرفتن خروجی، مشخص شد مناطق سبز رنگ از مطلوبیت زیستگاهی بیشتری برای گونه‌ی افعی جعفری



شکل ۱۰- نقشه مدل‌سازی زیستگاه افعی جعفری در ایران

بحث و نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش به وضوح نشان داد که افعی جعفری (*Echis carinatus*) به‌عنوان یک گونه کلیدی در اکوسیستم‌های خشک و نیمه‌خشک ایران، تحت تأثیر عوامل محیطی مختلف قرار دارد. با استفاده از مدل مکسنت، مناطق با مطلوبیت زیستگاهی بالا برای این گونه را شناسایی شدند که این امر می‌تواند به مدیریت و حفاظت از این گونه کمک کند.

مدل‌سازی نشان داد که متغیرهای دما، بارش و ارتفاع به‌ویژه دارای تأثیرات معناداری بر توزیع افعی جعفری هستند. به‌طور خاص، متغیر دما (bio1) و بارش در سردترین فصل (bio11) به‌عنوان عوامل کلیدی شناسایی شدند که تأثیر قابل‌توجهی بر مطلوبیت زیستگاه این گونه دارند.

نقشه‌های حاصل از مدل‌سازی نشان می‌دهند که مناطق جنوبی و جنوب‌غربی ایران و همچنین بخشی از فلات مرکزی از مطلوبیت بیشتری برای افعی جعفری برخوردار هستند. این مناطق نه تنها به دلیل شرایط اقلیمی مناسب، بلکه به‌خاطر وجود منابع غذایی و زیستگاهی متنوع، می‌توانند به‌عنوان زیستگاه‌های اصلی این گونه در نظر گرفته شوند.

با توجه به تهدیدات موجود مانند تغییرات اقلیمی، تخریب زیستگاه و فعالیت‌های انسانی، شناخت و حفاظت از زیستگاه‌های مناسب برای افعی جعفری اهمیت ویژه‌ای دارد. این پژوهش می‌تواند به‌عنوان مبنایی برای برنامه‌ریزی‌های حفاظتی و مدیریتی در راستای حفظ این گونه و اکوسیستم‌های مرتبط با آن مورد استفاده قرار گیرد. در نهایت، پیشنهاد می‌شود که مطالعات بیشتری در زمینه تأثیرات تغییرات اقلیمی بر توزیع گونه‌های مختلف و همچنین ارزیابی زیستگاه‌های جدید بالقوه برای افعی جعفری و سایر گونه‌های مشابه انجام شود. این اطلاعات می‌توانند به تصمیم‌گیری‌های آگاهانه‌تر در زمینه حفاظت از تنوع زیستی و مدیریت پایدار منابع طبیعی کمک کنند.

سپاسگزاری

بدین‌وسیله مراتب قدردانی و سپاس خود را از جناب دکتر محمد کابلی، استاد فرهیخته و گران‌قدر دانشگاه تهران، به‌دلیل راهنمایی‌های ارزنده و حمایت‌های بی‌دریغ علمی ایشان در تمامی مراحل انجام این پژوهش ابراز می‌دارم. بی‌تردید راهنمایی‌های دلسوزانه و نظرات دقیق و سازنده ایشان نقش به‌سزایی در ارتقای کیفیت این مقاله داشته است.

منابع

- Daniels JC (2002). The Book of Indian Reptiles and Amphibians. Mumbai: Bombay Natural History Society & Oxford University Press. 252 pp.
- Del Río, S., Canas, R., Cano, E., Cano-Ortiz, A., Musarella, C., Pinto-Gomes, C., Penas, A., 2021. Modeling the impacts of climate change on habitat suitability and vulnerability in deciduous forests in Spain. Ecological Indicators 131, 108202.
- Elith, J., Phillips, S. J., Hastie, T., Dudík, M., Chee, Y. E., & Yates, C. J. (2011). A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. Diversity and distributions, 17(1), 43-57.
- Fan, Z. F., Zhou, B. J., Ma, C. L., Gao, C., Han, D. N., & Chai, Y. (2022). Impacts of climate change on species distribution patterns of Polyspora sweet in China. Ecology and Evolution, 12(12), e9516.
- Guisan, A., & Thuiller, W. (2005). Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. Ecology letters, 8(9), 993-1009.
- IUCN Red List. (2016). "*Echis carinatus*." Retrieved from IUCN Red List.
- McDiarmid, R.W., Campbell, J.A., & Touré, T.A. (1999). Snake Species of the World: A Taxonomic and Geographic Reference, Volume 1. Washington, District of Columbia: Herpetologists' League. 511 pp.
- Phillips, S. J., Anderson, R. P., & Schapire, R. E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. Ecological modelling, 190(3-4), 231-259.
- Yousefi, M., Ahmadi, M., Nourani, E., Behrooz, R., Rajabizadeh, M., Geniez, P., & Kaboli, M. (2015). Upward altitudinal shifts in habitat suitability of mountain vipers since the last glacial maximum. PloS one, 10(9), e0138087.
- حیدرپور، ا. ر.، اشرف‌زاده، م. ر. و زمانی احمد محمودی، ر. (۱۴۰۰). مدل‌سازی زیستگاه‌های مطلوب و توصیه‌های حفاظتی برای مار آبی چلیپر (*Natrix tessellata*, Colubridae) در استان چهارمحال و بختیاری. محیط زیست جانوری، ۱۳(۲)، تابستان، ۱-۱۴.
- علی طاولی، ع. و کابلی، م. (۱۴۰۳). مدل‌سازی زیستگاه کبرای سیاه (*Walterinnesia morgani*) در ایران؛ تعیین پراکنش بالقوه کنونی و آتی گونه تحت شرایط زیستگاهی و تغییرات اقلیمی. نشریه محیط زیست طبیعی، ۷۷(۲)، ۱-۱۴.
- موسسه آموزش و تحقیقات جهانگردی طبیعت. (بی‌تا). گونه مار جعفری Saw- scaled Viper. قابل مشاهده در: <https://www.tabiat.ir/>.
- مؤسسه آموزش و تحقیقات جهانگردی طبیعت. گونه مار جعفری (*Echis carinatus*). بازیابی‌شده در ۷ فروردین ۱۴۰۴، از <https://www.tabiat.ir/page/11768/> گونه-مار-جعفری
- وارسته مرادی، ح. (۱۳۹۲). مدل‌سازی زیستگاه کفچه مار (*Naja naja oxiana*) در پارک ملی گلستان. نشریه پژوهش‌های محیط زیست، ۸، پاییز و زمستان، ۱-۱۴.
- یوسفی، م.، حسینیان یوسفخانی، س. س.، کفاش، ا.، رجبی‌زاده، م.، مرادپور، م. و رستگار پویانی، ا. (۱۴۰۲). مدل‌سازی خطر گزش افعی جعفری (*Echis carinatus*) تحت اقلیم حاضر و آینده در ایران. فصلنامه زیست‌شناسی جانوری تجربی، ۱۲(۱)، ۶۷-۷۵.
- Ahmadi, M., Hemami, M. R., Kaboli, M., & Shabani, F. (2023). MaxEnt brings comparable results when the input data are being completed; Model parameterization of four species distribution models. Ecology and Evolution, 13(2), e9827.



Modeling the Potential Habitat of the Horned Viper (*Echis carinatus*) in Iran under Climate Change Impacts

Saba Shokrollahi

Bachelor student of Environmental Science and Engineering, Department of Natural Environment, Faculty of Natural Resources, College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran
Author's E-mail: saba.shokrollahi@ut.ac.ir

Abstract

Echis carinatus, commonly known as the saw-scaled viper, is one of the most significant members of the Viperidae family in the arid and semi-arid regions of Iran. Due to its ecological role, predatory behavior, and wide distribution, it has drawn considerable attention. This study aimed to evaluate the potential habitat of this species using the MaxEnt (Maximum Entropy) model. Occurrence records along with 19 environmental variables were collected, and through principal component analysis, eight key variables were selected. The modeling results indicated that temperature, precipitation, and elevation are the most influential factors affecting the distribution of *E. carinatus*. The model's performance, with an AUC value of 0.882, suggests high predictive accuracy. The generated habitat suitability maps identified southern, southwestern, and parts of central Iran—particularly the provinces of Kerman, Fars, and Bushehr—as having more favorable habitats. These findings can contribute to more effective management and conservation planning, especially in the face of climate change and habitat degradation. Utilizing MaxEnt as a powerful modeling tool enables more accurate predictions of species distribution and supports biodiversity conservation efforts in vulnerable regions of Iran.

Keywords: Horned viper, MaxEnt model, habitat suitability, climate change, Middle Eastern ecosystems