

Assessing the Effects of Aridity Gradient and Soil Chemical Groups on Biomass and Species Richness of *Gundelia tournefortii* L. in Dry Rangelands of Qom Province, Iran

Elham Khoshsima¹, Iraj Mehregan^{1,2}, Younes Asri^{3*}, Seyed Jalil Alavi⁴ and Hamid Reza Akkafi⁵

1- Department of Biology, SR.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran

2- Institute for Biology and Environmental Sciences, Carl von Ossietzky-University Oldenburg, Oldenburg, Germany

3- Department of Botany, Research Institute of Forests and Rangelands; Agricultural Research Education and Extension (AREEO), Tehran, Iran

4- Department of Forest Sciences and Engineering, Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University, Nur, Mazandaran, Iran

5- Department of Biology, Fal.C., Islamic Azad University, Isfahan, Iran

* Corresponding author, Email: asri@rifr-ac.ir

Abstract

Background and Objectives: Dry rangelands in Qom Province are characterized by water limitation, soil heterogeneity, and local variation. Despite the medicinal and food value of *Gundelia tournefortii* L., the roles of climatic aridity and soil chemical conditions in its biomass and species richness remain unclear. This study aimed to examine the relationship between aridity gradient and *G. tournefortii* biomass, compare biomass and species richness among soil chemical groups, and assess whether soil chemical groups modify the relationship between aridity and biomass.

Methods: The study was conducted across 10 dry-rangeland localities in Qom Province, Iran. A total of 300 plots (2 × 2 m) were surveyed, and soil characteristics were determined from 29 independent soil profiles. Flowering-branch dry weight of *G. tournefortii* and plot-level species richness were recorded. Soil chemical groups were derived by standardizing organic carbon, available phosphorus, and available potassium, followed by Euclidean-distance clustering using Ward.D2, resulting in three groups. The De Martonne aridity index was calculated from annual temperature and precipitation. Statistical analyses were performed in R version 4.6.0 using mixed-effects models.

Results: Mean flowering-branch dry weight was 18.06 g, while mean species richness was 5.13 species per plot. Soil chemical groups did not significantly affect dry weight ($\chi^2 = 0.43$, $P = 0.806$) or species richness ($\chi^2 = 0.98$, $P = 0.614$). The relationship between the De Martonne index and dry weight was non-significant ($R^2 = 0.094$, $P = 0.388$). The interaction between aridity and soil chemical groups was not significant ($\chi^2 = 0.15$, $P = 0.930$).

Conclusion: Within the conditions examined, annual aridity and soil chemical groups, individually or interactively, did not sufficiently explain variation in biomass or species richness. These findings highlight the importance of local environmental conditions, topography, biotic processes, and temporal variation in water availability when assessing vegetation responses in dry rangelands.

Keywords: Climatic aridity, De Martonne index, Plant diversity, Soil organic carbon, Soil chemical groups.

بررسی نقش گرادیان خشکی و گروه‌های شیمیایی خاک بر زیست‌توده و غنای گونه‌ای کنگر (*Gundelia tournefortii* L.) در مراتع خشک استان قم، ایران

الهام خوش‌سیما^۱، ایرج مهرگان^{۱،۲}، یونس عصری^{۳*}، سید جلیل علوی^۴ و حمیدرضا عکافی^۵

۱- گروه زیست‌شناسی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- مؤسسه زیست‌شناسی و علوم محیطی، دانشگاه کارل فون اوسه تسکی اولدنبورگ، اولدنبورگ، آلمان

۳- بخش تحقیقات گیاه‌شناسی، مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور؛ سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

۴- گروه علوم و مهندسی جنگل، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران

۵- گروه زیست‌شناسی، واحد فلاورجان، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: asri@rifr-ac.ir

چکیده

پیشینه و هدف: مراتع خشک استان قم با محدودیت آب، ناهمگونی خاک و تفاوت‌های محیطی در مقیاس محلی مواجه‌اند. با وجود ارزش دارویی و غذایی کنگر (*Gundelia tournefortii* L.)، نقش خشکی اقلیمی و گروه‌های شیمیایی خاک در تغییرات زیست‌توده و غنای گونه‌ای آن کمتر بررسی شده است. این پژوهش با هدف بررسی رابطه گرادیان خشکی با زیست‌توده کنگر، مقایسه زیست‌توده و غنای گونه‌ای میان گروه‌های شیمیایی خاک و بررسی نقش تعدیل‌کنندگی این گروه‌ها در رابطه بین خشکی و زیست‌توده انجام شد.

روش‌ها: این مطالعه در ۱۰ منطقه از مراتع خشک استان قم انجام شد. در مجموع، ۳۰۰ پلات ۲×۲ متر بررسی و ویژگی‌های خاک بر اساس ۲۹ پروفایل مستقل تعیین شد. وزن خشک سرشاخه گل‌دهنده *G. tournefortii* و غنای گونه‌ای در هر پلات ثبت شد. برای تشکیل گروه‌های شیمیایی خاک، کربن آلی، فسفر و پتاسیم قابل جذب استاندارد و با استفاده از فاصله اقلیدسی و روش Ward.D2 به سه گروه تقسیم شدند. شاخص خشکی دومارتین بر اساس دما و بارش سالانه محاسبه شد. تحلیل‌های آماری با نرم‌افزار R نسخه ۴.۶.۰ و مدل‌های آمیخته انجام شد.

نتایج: میانگین وزن خشک سرشاخه گل‌دهنده ۱۸.۰۶ گرم و غنای گونه‌ای ۵.۱۳ گونه در پلات بود. گروه‌های شیمیایی خاک بر وزن خشک ($\chi^2 = 0.43, P = 0.806$) و غنای گونه‌ای ($\chi^2 = 0.98, P = 0.614$) اثر معنی‌داری نداشت. رابطه شاخص دومارتین با وزن خشک نیز معنی‌دار نبود ($R^2 = 0.094, P = 0.388$). همچنین، برهم‌کنش خشکی و گروه‌های شیمیایی خاک معنی‌دار نبود ($\chi^2 = 0.15, P = 0.930$).

نتیجه‌گیری: در دامنه شرایط بررسی‌شده، خشکی سالانه و گروه‌های شیمیایی خاک، به‌تنهایی یا در تعامل با یکدیگر، تغییرات زیست‌توده و غنای گونه‌ای را به‌طور کافی توضیح ندادند. این یافته بر اهمیت بررسی هم‌زمان عوامل محلی، توپوگرافی، زیستی و تغییرات زمانی دسترسی به آب در مطالعه پاسخ پوشش گیاهی مراتع خشک تأکید دارد.

واژه‌های کلیدی: تنوع گیاهی، خشکی اقلیمی، شاخص دومارتین، کربن آلی خاک، گروه‌های شیمیایی خاک.

مقدمه

اکوسیستم‌های خشک و نیمه‌خشک در مرز باریکی میان دسترسی به آب، توان نگهداری رطوبت خاک و ظرفیت رشد گیاهان قرار دارند. در چنین سامانه‌هایی، تغییر در بارش و دما می‌تواند مستقیماً دسترسی به آب را محدود کند، اما شدت پاسخ پوشش گیاهی الزاماً تابعی ساده از اقلیم نیست؛ زیرا ویژگی‌های خاک، توپوگرافی و تاریخچه اختلال می‌توانند اثر محدودیت آب را تقویت یا تضعیف کنند (Taleshi et al., 2019; Zhang et al., 2022). در ایران نیز شاخص‌های خشکی در مقیاس‌های منطقه‌ای تغییرپذیری قابل توجهی دارند (Tabari et al., 2014).

کنگر (*Gundelia tournefortii* L.) از گونه‌های شاخص مراتع خشک و نیمه‌استپی ایران است و علاوه بر اهمیت اکولوژیک، ارزش غذایی و دارویی دارد (Kaval et al., 2015; Khalasi Ahvazi et al., 2016). مطالعات منطقه‌ای نشان داده‌اند که پراکنش و صفات ریخت‌شناختی این گونه با مجموعه‌ای از متغیرهای محیطی، از جمله بارش، ارتفاع، شیب، پتاسیم قابل جذب، هدایت الکتریکی و طول دوره خشکی مرتبط است (Salehi Ardali et al., 2017; Karimzadeh et al., 2023a). همچنین، ویژگی‌های بوم‌شناختی غالب نظیر پتاسیم قابل جذب، مقاومت برشی خاک، هدایت الکتریکی، طول دوره خشکی و متوسط دمای سالانه به‌عنوان مهم‌ترین عوامل مؤثر بر تغییرات ریخت‌شناسی اندام‌های زایشی این گونه شناسایی شده‌اند (Karimzadeh et al., 2023b). پژوهش‌های انجام‌شده نشان داده است که ویژگی‌های خاک و مدیریت چرا می‌توانند نقش مهمی در تغییرات جمعیت این گونه ایفا کنند (Khojasteh and Zare Chahouki, 2013). بااین‌حال، ارتباط یک متغیر محیطی با یک صفت مشخص الزاماً به معنای کنترل همان متغیر بر زیست‌توده یا غنای گونه‌ای در مقیاس‌های دیگر نیست.

خاک از طریق ذخیره آب، تأمین عناصر غذایی و ایجاد بستر مناسب برای ریشه‌دوانی، یکی از مهم‌ترین عوامل محیطی محلی مؤثر بر جوامع گیاهی است. کربن آلی می‌تواند ظرفیت نگهداری آب و پایداری ساختار خاک را افزایش دهد و عناصر غذایی مانند

پتاسیم، نیتروژن و فسفر بر رشد و تخصیص زیست‌توده اثر بگذارند. از سوی دیگر، اثر خاک بر تنوع گیاهی اغلب به شرایط اقلیمی و ویژگی‌های بافتی وابسته است و افزایش یک شاخص خاکی الزاماً به افزایش غنای گونه‌ای منجر نمی‌شود (Hulshof and Spasojevic, 2020; Díaz et al., 2016). کنترل ادافیکی تنوع گیاهی از طریق چهار فرایند اصلی اجتماع (گونه‌زایی، پراکنش، رانش اکولوژیک و انتخاب نیچ) عمل می‌کند که در آن ناهمگونی خاک با ایجاد تنوع ریزمحیط‌ها، فرصت‌های جدیدی برای گونه‌زایی و تفکیک نیچ فراهم می‌آورد (Hulshof and Spasojevic, 2020). پژوهش‌های انجام‌شده در مراتع و بیابان‌های استان خراسان جنوبی نشان داده است که مقدار کربن آلی خاک در رویشگاه‌های مختلف بین ۰/۰۷ تا ۰/۹۷ درصد متغیر است و بیشترین مقدار آن در خاک رویشگاه گونه‌های درختچه‌ای مشاهده می‌شود (Azarmi-Atajan and Rostampour, 2025). این یافته‌ها بیانگر آن است که نوع پوشش گیاهی و فرم زیستی گونه‌ها نقش تعیین‌کننده‌ای در میزان کربن آلی خاک ایفا می‌کنند.

مطالعه هم‌زمان اثر خشکی و گروه‌های شیمیایی خاک بر زیست‌توده و تنوع گیاهی در مقیاس محلی با چالش‌های روش‌شناختی همراه است. شاخص‌های اقلیمی معمولاً در سطح منطقه‌ای محاسبه می‌شوند و تغییرات ریزمقیاس را منعکس نمی‌کنند (Tabari et al., 2014). ویژگی‌های خاک نیز تحت تأثیر مدیریت، زمین‌شناسی و توپوگرافی قرار دارند که تفکیک اثر آن‌ها را دشوار می‌سازد (Hulshof and Spasojevic, 2020). افزون بر این، ساختار سلسله‌مراتبی داده‌ها (پلات‌های درون رویشگاه) در صورت نادیده‌گرفتن، به شبه‌تکرار و برآورد بیش از حد توان آماری منجر می‌شود (Bolker et al., 2009; Harrison et al., 2018). با وجود این پیشینه، شکاف دانشی مهمی در مورد چگونگی تعامل عوامل اقلیمی و خاکی در مقیاس‌های محلی وجود دارد. به‌ویژه، اینکه آیا گروه‌های شیمیایی خاک می‌تواند اثر خشکی بر زیست‌توده و غنای گونه‌ای را تعدیل کند، در اکوسیستم‌های خشک ایران به‌ندرت آزمون شده است. ازاین‌رو،

پژوهش حاضر با استفاده از مدل‌های آمیخته که امکان کنترل ساختار سلسله‌مراتبی و وابستگی درون‌گروهی را فراهم می‌آورند (Bolker et al., 2009; Harrison et al., 2018)، سه هدف اصلی را دنبال می‌کند: (۱) بررسی ارتباط شاخص خشکی دومارتن با زیست‌توده و غنای گونه‌ای؛ (۲) بررسی تفاوت این دو پاسخ میان گروه‌های گروه‌های شیمیایی خاک؛ و (۳) بررسی نقش تعدیل‌کنندگی گروه‌های شیمیایی خاک در اثر خشکی بر زیست‌توده.

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعه و طراحی نمونه‌برداری: پژوهش در ۱۰ رویشگاه مرتعی استان قم شامل انجیله، برف‌انبار، دستجرد، فردو، گلستان، کرمجگان، سنجگان، وسف، وشنوه و زواریان انجام شد. رویشگاه‌ها دامنه‌ای از شرایط اقلیمی و ارتفاعی حدود ۱۵۰۰ تا ۲۹۰۰ متر را پوشش دادند. نمونه‌برداری در اردیبهشت ۱۴۰۴ (همزمان با اوج گلدهی کامل گیاه) انجام شد. در هر رویشگاه ۳۰ پلات 2×2 متر مستقر شد. تعیین اندازه پلات‌ها با روش سطح حداقل و استقرار پلات‌های تودرتو در منطقه معرف انجام شد. با استفاده از روش سیستماتیک-تصادفی، نقطه شروع به‌صورت تصادفی انتخاب شد و سپس پلات‌ها با فاصله حداقل ۵۰ متر از یکدیگر در امتداد ترانسکت‌های موازی مستقر شدند. برای ارزیابی ویژگی‌های خاک، در ۹ منطقه سه پروفیل و در منطقه گلستان دو پروفیل مستقل بررسی شد و در مجموع داده‌های خاک مربوط به ۳۰۰ پلات از ۲۹ پروفیل مستقل خاک به‌دست آمد. لازم به ذکر است که داده‌های خاک مربوط به رویشگاه گلستان، برگرفته از داده‌های پایان‌نامه کارشناسی ارشد یکی از نویسندگان (Khoshsima et al., 2013) بوده که در آن پژوهش با نام‌های محلی طغرود و جعفریه ثبت شده‌اند. با توجه به قرارگیری این مناطق در یک حوزه آبخیز مشترک و به‌منظور یکپارچه‌سازی نام‌گذاری در مقاله حاضر، از نام محلی «گلستان» (برگرفته از نام کوه منطقه) استفاده شده است. مابقی رویشگاه‌ها در سال ۱۴۰۴ نمونه‌برداری شده‌اند. با این حال، روش‌های نمونه‌برداری، آزمایشگاهی و آنالیز خاک در هر دو مرحله کاملاً

یکسان بوده است.

اندازه‌گیری خاک: از چند نقطه و از عمق ۰-۳۰ سانتی‌متر، زیرنمونه‌های خاک برداشت شد. پس از ترکیب و مخلوط‌سازی کامل زیرنمونه‌ها، نمونه‌ی مرکب به وزن تقریبی ۱ کیلوگرم به‌عنوان نمونه نهایی برای آنالیزهای آزمایشگاهی آماده گردید. نمونه‌های خاک پس از خشک‌شدن در هوای آزاد و عبور از الک ۲ میلی‌متری، در آزمایشگاه خاک اداره جهاد کشاورزی استان قم مورد آنالیز قرار گرفتند. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک شامل بافت خاک با تعیین درصد شن، سیلت و رس به روش هیدرومتری، اسیدیته (pH) و هدایت الکتریکی (EC) در عصاره اشباع، کربن آلی با روش والکلی-بلک (Walkley and Black, 1934)، نیتروژن کل با روش کج‌لدال (Bremner, 1965)، فسفر قابل‌جذب با روش اولسن (Olsen et al., 1954) و پتاسیم قابل‌جذب با استفاده از فلیم‌فوتومتر اندازه‌گیری شد (Black, 1979). برای تشکیل گروه‌های شیمیایی خاک، متغیرهای کربن آلی (OC)، فسفر قابل‌جذب (P) و پتاسیم قابل‌جذب (K) انتخاب شدند. نیتروژن کل به دلیل همبستگی بسیار زیاد با کربن آلی در داده‌های این مطالعه ($r = 0.994$) وارد گروه‌بندی نشد. در مقابل، فسفر با کربن آلی همبستگی ضعیفی داشت ($r = 0.157$) و حفظ شد. ویژگی‌های بافتی شامل شن، سیلت و رس نیز به دلیل ماهیت فیزیکی آن‌ها و همبستگی بین اجزای بافت در گروه‌بندی وارد نشدند. بافت خاک یک بعد متفاوت از گروه‌های شیمیایی خاک است و بنابراین برای جلوگیری از مخلوط‌کردن ابعاد متفاوت محیطی، وارد خوشه‌بندی نشده است. pH و EC نیز به‌صورت جداگانه در نظر گرفته شدند.

مقادیر OC، P و K استانداردسازی و با استفاده از فاصله اقلیدسی و روش Ward.D2 به سه گروه تقسیم شدند. میانگین ضریب سیلوئت این گروه‌بندی ۰/۴۳۷ بود. برای سهولت در ارائه نتایج، این خوشه‌ها به‌عنوان گروه‌های ۱ تا ۳ گزارش شدند. بدیهی است که این گروه‌بندی یک ابزار اکتشافی برای درک الگوهای مکانی است و نه یک طبقه‌بندی مطلق از نظر گروه‌های شیمیایی خاک است.

داده‌های اقلیمی: داده‌های اقلیمی از پایگاه WorldClim با تفکیک مکانی ۱ کیلومتر و میانگین دما و بارندگی سالانه از ایستگاه‌های هواشناسی استان قم برای دوره ۱۳۸۲ تا ۱۴۰۴ استخراج شد. شاخص خشکی دومارتن بر اساس رابطه $I = P/(T + 10)$ از داده‌های این ایستگاه‌های سینوپتیک محاسبه شد. مقادیر پایین‌تر شاخص نشان‌دهنده شرایط خشک‌تر است (Tabari et al., 2014). برای برخی رویشگاه‌ها که فاقد ایستگاه مستقل بودند، از داده‌های نزدیک‌ترین ایستگاه مشترک استفاده شد؛ بنابراین ممکن است مقادیر اقلیمی برخی رویشگاه‌ها یکسان باشند.

متغیرهای گیاهی: در هر پلات، وزن خشک سرشاخه گل‌دهنده، ارتفاع بوته و سطح برگ افراد *Gundelia tournefortii* ثبت شد. این سه ویژگی مربوط به افراد کنگر صحرایی بودند. وزن خشک سرشاخه‌های گل‌دهنده پس از خشک‌شدن در آون تا رسیدن به وزن ثابت، با ترازوی دیجیتالی با دقت ۰/۰۰۱ گرم اندازه‌گیری شد. سطح برگ با برداشت برگ‌های انتخاب‌شده از بوته‌های مورد مطالعه و اندازه‌گیری سطح آن‌ها با استفاده از نرم‌افزار ImageJ اندازه‌گیری شد. همچنین تعداد گونه‌های موجود در هر پلات به‌عنوان شاخص غنای گونه‌ای ثبت گردید.

تحلیل آماری: تمام تحلیل‌های آماری با استفاده از نرم‌افزار R 4.6.0 انجام شد (R Core Team, 2025). برای بررسی رابطه میانگین وزن خشک سرشاخه گل‌دهنده و شاخص خشکی دومارتن در سطح منطقه، رگرسیون خطی با میانگین‌های منطقه‌ای انجام شد. برای بررسی اثر گروه‌های شیمیایی خاک بر وزن خشک سرشاخه گل‌دهنده، از مدل آمیخته گاما با تابع پیوند لگاریتمی استفاده شد. برای غنای گونه‌ای نیز مدل آمیخته COM-Poisson با تابع پیوند لگاریتمی به‌کار رفت. در این مدل‌ها، گروه‌های شیمیایی خاک اثر ثابت و منطقه اثر تصادفی در نظر گرفته شد. مدل‌های آمیخته تعمیم‌یافته با استفاده از چارچوب glmmTMB برازش شدند (Brooks et al., 2017).

برای بررسی نقش تعدیل‌کنندگی گروه‌های شیمیایی خاک، مدل آمیخته گاما شامل شاخص خشکی دومارتن، گروه‌های شیمیایی خاک و برهم‌کنش آن‌ها بر وزن خشک سرشاخه

گل‌دهنده برازش شد.

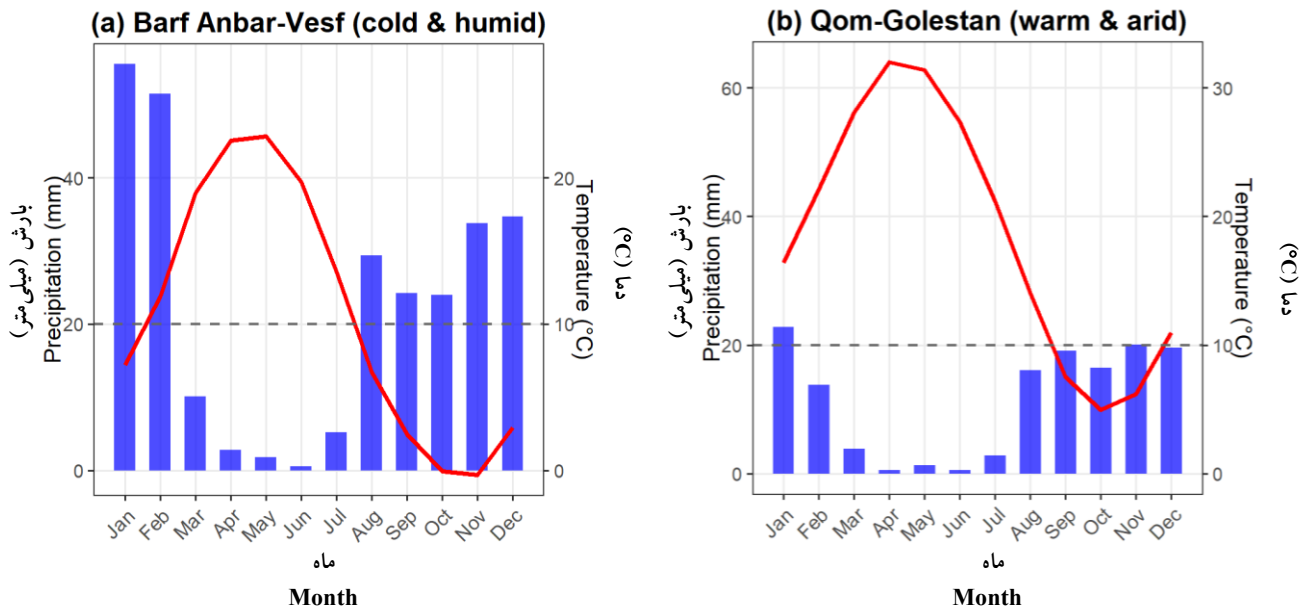
میانگین‌های حاشیه‌ای برآورد شده (Estimated Marginal Means; EMMs) و مقایسه‌های زوجی با اصلاح Tukey محاسبه شدند. ارزیابی باقیمانده‌ها و تشخیص برازش مدل‌ها با استفاده از DHARMA انجام شد. همچنین، به‌منظور بررسی حساسیت نتایج نسبت به وابستگی چند پلات به یک پروفایل خاک، مدل‌های تکمیلی با وارد کردن شناسه نمونه خاک (Soil_ID) به‌عنوان اثر تصادفی برازش شدند.

نتایج

شرایط اقلیمی و خاکی منطقه: شاخص خشکی دومارتن در ۱۰ رویشگاه از ۴/۸۰ تا ۱۳/۲۱ متغیر بود. میانگین وزن خشک سرشاخه گل‌دهنده در کل داده‌ها $12/76 \pm 1/06$ گرم و غنای گونه‌ای $5/13 \pm 1/87$ گونه در پلات بود. تفاوت اقلیمی دو رویشگاه حدی در شکل ۱ قابل مشاهده است. مقادیر دما و بارش در جدول ۱ بر اساس داده‌های ایستگاه هواشناسی استان قم و مقادیر میانگین ویژگی‌های خاک بر اساس میانگین ۳۰ پلات در هر رویشگاه محاسبه شده‌اند. داده‌های خاک مربوط به ۳۰۰ پلات از ۲۹ پروفایل مستقل خاک به‌دست آمد.

ماتریس همبستگی: ماتریس همبستگی پیرسون بین متغیرهای خاک، ویژگی‌های گیاهی و متغیرهای اقلیمی در شکل ۲ ارائه شده است. همبستگی بسیار زیادی بین کربن آلی و نیتروژن کل مشاهده شد ($r \approx 0.99$)، درحالی‌که همبستگی فسفر با کربن آلی ضعیف بود ($r = 0.157$). پتاسیم با کربن آلی همبستگی متوسطی داشت ($r = 0.41$) و با رس نیز همبستگی مثبت نشان داد ($r = 0.43$). همچنین وزن خشک سرشاخه گل‌دهنده با ارتفاع بوته و سطح برگ همبستگی بسیار زیادی داشت ($r \approx 0.99$).

اثر گروه‌های شیمیایی خاک بر زیست‌توده: گروه‌های شیمیایی خاک اثر معنی‌داری بر وزن خشک سرشاخه گل‌دهنده نداشت ($\chi^2 = 0.43$, $df = 2$, $P = 0.806$). میانگین‌های حاشیه‌ای برآورد شده وزن خشک در گروه‌های ۱، ۲ و ۳ به‌ترتیب ۱۳/۵، ۱۳/۱۶ و ۱۳/۱۶ گرم بود (جدول ۲). مقایسه‌های زوجی نیز



شکل ۱. نمودارهای والتر-لیت برای دو رویشگاه منتخب: (a) برف‌انبار-وسف (سرد و مرطوب، ۱۳۹۶-۱۴۰۴) و (b) قم-گلستان (گرم و خشک، ۱۳۶۵-۱۴۰۴) که گرادان اقلیمی منطقه مطالعه را نشان می‌دهند.

Fig. 1. Walter-Lieth diagrams for two selected habitats: (a) Barf Anbar-Vesf (colder and wetter, 2017–2025) and (b) Qom-Golestan (warmer and drier, 1986–2025), illustrating the climatic gradient of the study area.

تفاوت معنی‌داری بین گروه‌ها نشان نداد. نسبت گروه ۱ به ۲ برابر $P = 0.910$ و نسبت گروه ۱ به ۳ برابر $P = 0.808$ و نسبت گروه ۲ به ۳ برابر $P = 0.976$ بود (میانگین $18/06$ گرم مربوط به میانگین خام مشاهدات است، درحالی‌که مقادیر جدول ۲ میانگین‌های حاشیه‌ای برآوردشده از مدل هستند).

اثر گروه‌های شیمیایی خاک بر غنای گونه‌ای: گروه‌های شیمیایی خاک اثر معنی‌داری بر غنای گونه‌ای نداشت ($\chi^2 = 0.47$, $df = 2$, $P = 0.791$). همچنین برهم‌کنش شاخص خشکی و گروه‌های شیمیایی خاک اثر معنی‌داری نداشت ($\chi^2 = 0.15$, $df = 2$, $P = 0.930$; جدول ۴).

تحلیل حساسیت با در نظر گرفتن شناسه نمونه خاک به‌عنوان اثر تصادفی نیز نتایج مشابهی نشان داد. در این مدل (با ورود شناسه نمونه خاک به‌عنوان اثر تصادفی)، اثر گروه‌های شیمیایی خاک معنی‌دار نبود ($\chi^2 = 0.12$, $df = 2$, $P = 0.944$) و میانگین‌های برآوردشده سه گروه به‌ترتیب $13/7$ ، $13/5$ و $13/6$ گرم بودند که تفاوت جزئی آن با مدل اصلی ($13/9$ ، $13/5$ و $13/6$) ناشی از توزیع مجدد واریانس است. برهم‌کنش شاخص خشکی و گروه‌های شیمیایی خاک نیز معنی‌دار نبود ($\chi^2 = 0.03$, $df = 2$, $P = 0.985$).

تفاوت معنی‌داری بین گروه‌ها نشان نداد. نسبت گروه ۱ به ۲ برابر $P = 0.910$ و نسبت گروه ۱ به ۳ برابر $P = 0.808$ و نسبت گروه ۲ به ۳ برابر $P = 0.976$ بود (میانگین $18/06$ گرم مربوط به میانگین خام مشاهدات است، درحالی‌که مقادیر جدول ۲ میانگین‌های حاشیه‌ای برآوردشده از مدل هستند).

اثر گروه‌های شیمیایی خاک بر غنای گونه‌ای: گروه‌های شیمیایی خاک اثر معنی‌داری بر غنای گونه‌ای نداشت ($\chi^2 = 0.47$, $df = 2$, $P = 0.791$). همچنین برهم‌کنش شاخص خشکی و گروه‌های شیمیایی خاک اثر معنی‌دار نبود ($\chi^2 = 0.15$, $df = 2$, $P = 0.930$; جدول ۴).

تحلیل حساسیت با در نظر گرفتن شناسه نمونه خاک به‌عنوان اثر تصادفی نیز نتایج مشابهی نشان داد. در این مدل (با ورود شناسه نمونه خاک به‌عنوان اثر تصادفی)، اثر گروه‌های شیمیایی خاک معنی‌دار نبود ($\chi^2 = 0.12$, $df = 2$, $P = 0.944$) و میانگین‌های برآوردشده سه گروه به‌ترتیب $13/7$ ، $13/5$ و $13/6$ گرم بودند که تفاوت جزئی آن با مدل اصلی ($13/9$ ، $13/5$ و $13/6$) ناشی از توزیع مجدد واریانس است. برهم‌کنش شاخص خشکی و گروه‌های شیمیایی خاک نیز معنی‌دار نبود ($\chi^2 = 0.03$, $df = 2$, $P = 0.985$).

رابطه شاخص خشکی با وزن خشک و اثر متقابل گروه‌های شیمیایی خاک: رگرسیون خطی در سطح منطقه نشان داد که رابطه بین شاخص دومارتن و میانگین وزن خشک سرشاخه

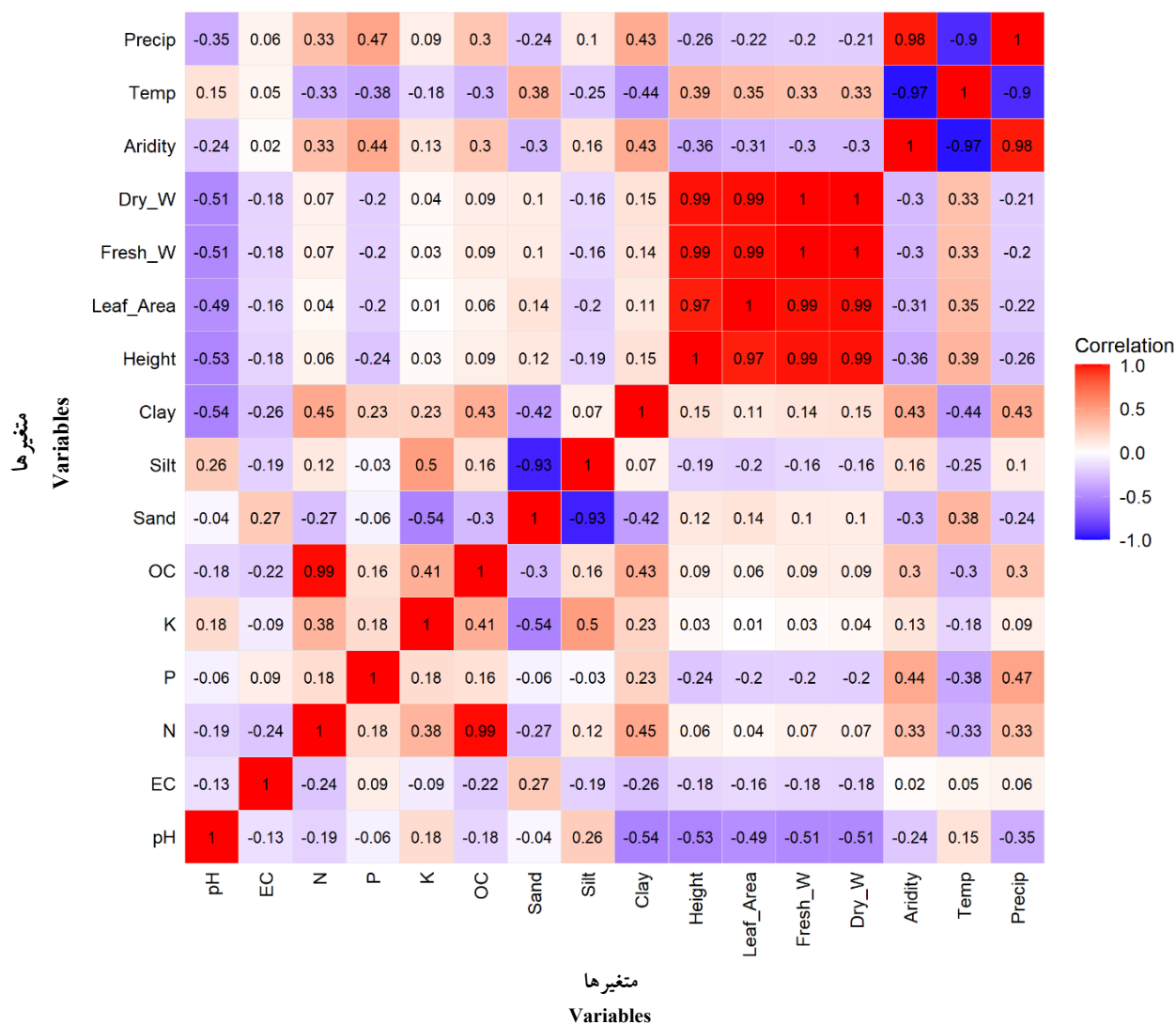
جدول ۱. ویژگی‌های خاکی و اقلیمی رویشگاه‌های مطالعه‌شده.

Table 1. Soil and climatic characteristics of the studied localities.

رویشگاه / Locality	ارتفاع (متر) Elevation (m)	رس (%) Clay (%)	سیلت (%) Silt (%)	شن (%) Sand (%)	هدایت الکتریکی EC (dS/m)	اسیدیته pH	کربن آلی OC (%)	ازت N (%)	فسفر P (mg/kg)	پتاسیم K (mg/kg)	دومارتن De Martonne	دما T (°C)	بارش P (mm)
انجیله / Anjileh	2079	12.67	22.67	64.67	2.3	7.5	0.68	0.050	30.02	239	10.93	11.2	268
برف‌انبار / Barf Anbar	2617	22.33	31.00	46.67	1.2	7.3	0.45	0.091	28.66	386	13.21	9.5	274
دستجرد / Dastjerd	1784	19.67	25.00	55.33	1.2	7.0	0.72	0.120	14.85	331	8.73	12.0	216
فردو / Fordu	2237	12.00	40.33	47.67	1.0	7.7	0.60	0.057	4.77	257	6.10	13.5	165
گلستان / Golestan	1500	8.60	17.85	73.55	1.6	7.9	0.60	0.045	8.33	246	4.80	15.0	137
کرمجگان / Kermejegan	2048	18.33	18.33	63.33	0.9	7.0	0.72	0.112	13.33	257	10.76	11.0	263
سنجگان / Senjegan	1700	18.33	11.00	70.67	1.2	7.0	0.90	0.085	4.93	166	6.46	13.0	177
وسف / Vesf	2572	14.67	36.33	49.00	1.0	7.6	1.10	0.104	5.53	402	13.21	9.8	274
وشنوه / Veshnaveh	2054	12.67	32.67	54.67	1.1	7.2	0.70	0.023	7.11	366	6.10	13.2	165
زواریان / Zavarian	1597	15.33	33.67	51.00	1.0	7.5	0.70	0.070	3.53	476	6.46	12.8	177

یادداشت: میانگین‌های جدول برای پروفایل‌های موجود محاسبه شده‌اند. برای گلستان، میانگین منطقه‌ای بر اساس تعداد پلات‌های وابسته به هر پروفایل محاسبه شده است.

Note: Means were calculated from the available soil profiles. For Golestan, the regional mean was calculated according to the number of plots represented by each soil profile.



شکل ۲. ماتریس همبستگی پیرسون متغیرهای خاک، گیاه و اقلیم. اعداد درون سلول‌ها نشان‌دهنده ضرایب همبستگی پیرسون هستند.

همبستگی‌های بالا (نزدیک به ۱ یا -۱) نشان‌دهنده هم‌خطی قوی بین متغیرهاست.

Fig. 2. Pearson correlation matrix of soil, plant, and climate variables. Numbers in cells represent Pearson correlation coefficients. High correlations (close to ± 1) indicate strong collinearity among variables.

جدول ۲. میانگین‌های حاشیه‌ای برآورد شده وزن خشک سرشاخه گل‌دهنده در گروه‌های شیمیایی خاک

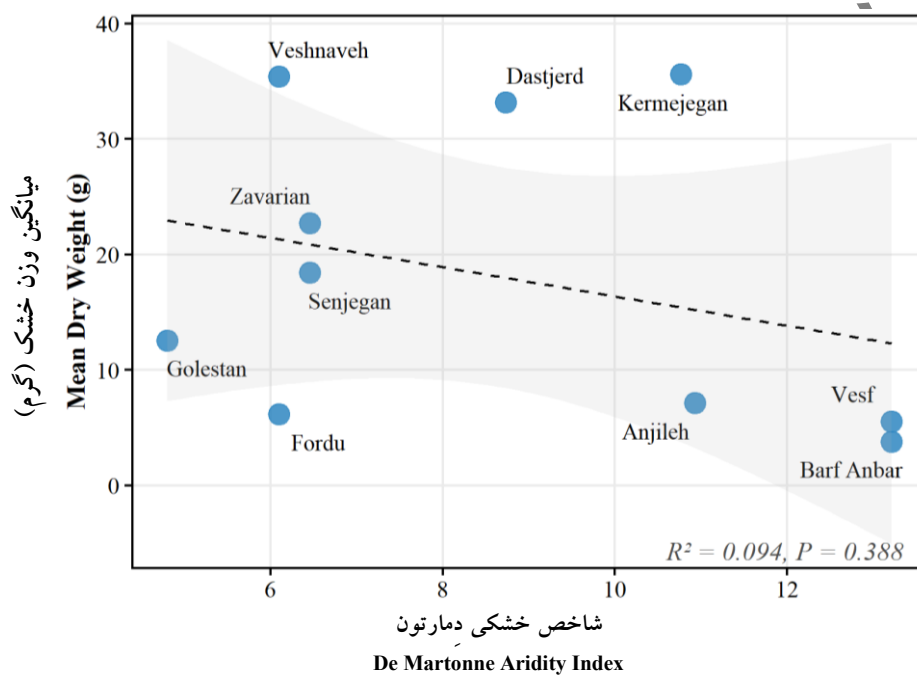
Table 2. Estimated marginal means of flowering-branch dry weight across soil chemical groups.

حد بالا ۹۵٪ 95% UCL	حد پایین ۹۵٪ 95% LCL	خطای استاندارد SE	میانگین (گرم) Mean (g)	گروه‌های شیمیایی خاک Soil-status group
23.0	8.36	3.59	13.9	گروه ۱ / Group 1
22.2	8.17	3.44	13.5	گروه ۲ / Group 2
22.4	8.20	3.48	13.6	گروه ۳ / Group 3

جدول ۳. میانگین‌های حاشیه‌ای برآوردشده غنای گونه‌ای در گروه‌های شیمیایی خاک.

Table 3. Estimated marginal means of species richness across soil chemical groups.

حد بالا ۹۵٪ 95% UCL	حد پایین ۹۵٪ 95% LCL	خطای استاندارد SE	غنای گونه‌ای Richness	گروه‌های شیمیایی خاک Soil chemical groups
6.39	3.96	0.614	5.03	گروه ۱ / Group 1
6.00	3.86	0.540	4.81	گروه ۲ / Group 2
6.10	3.90	0.556	4.88	گروه ۳ / Group 3



شکل ۳. رابطه بین شاخص خشکی دمارتن و میانگین وزن خشک سرشاخه گل‌دهنده کنگر صحرایی در ۱۰ رویشگاه. خط چین نشان‌دهنده رگرسیون خطی است (غیرمعنی‌دار، $R^2 = 0.094$, $P = 0.388$).

Fig. 3. Relationship between the De Martonne aridity index and mean flowering-branch dry weight of *Gundelia tournefortii* at 10 localities. The dashed line represents the linear regression (non-significant, $P = 0.388$, $R^2 = 0.094$).

جدول ۴. خلاصه نتایج مدل آمیخته بررسی اثر خشکی، گروه‌های شیمیایی خاک و برهم‌کنش آن‌ها بر وزن خشک سرشاخه گل‌دهنده.

Table 4. Summary of the mixed-effects model testing the effects of aridity, soil chemical groups and their interaction on flowering-branch dry weight.

اثر Effect	آماره والد (Wald χ^2)	درجه آزادی df	سطح معنی‌داری P
شاخص خشکی دمارتن De Martonne aridity index	2.81	1	0.094
گروه‌های شیمیایی خاک Soil chemical groups	0.47	2	0.791
شاخص خشکی × گروه‌های شیمیایی خاک Aridity × Soil chemical groups	0.15	2	0.930

بحث

یافته‌های پژوهش حاضر نشان داد که گروه‌های شیمیایی خاک، که بر اساس ترکیب نسبی کربن آلی، فسفر قابل جذب و پتاسیم تشکیل شدند، تفاوت معنی‌داری در وزن خشک سرشاخه گل‌دهنده *Gundelia tournefortii* ایجاد نکردند. میانگین‌های حاشیه‌ای برآوردشده در سه گروه به ترتیب ۱۳/۹، ۱۳/۵ و ۱۳/۶ گرم بود و اختلاف کلی بین گروه‌ها معنی‌دار نبود ($\chi^2 = 0.43$, $df = 2$, $P = 0.806$). غنای گونه‌ای نیز بین گروه‌های شیمیایی خاک تفاوت معنی‌داری نداشت ($\chi^2 = 0.98$, $df = 2$, $P = 0.614$). این یافته لزوماً به معنای بی‌اهمیت بودن ویژگی‌های خاک نیست، بلکه نشان می‌دهد گروه‌بندی نسبی بر اساس مجموعه محدودی از ویژگی‌های شیمیایی خاک، در دامنه محیطی مورد بررسی، قدرت کافی برای آشکار کردن تفاوت در زیست‌توده و غنای گونه‌ای نداشته است. مطالعات نیز نشان داده‌اند که اثر ویژگی‌های ادافیکی بر تنوع گیاهی به شرایط محیطی و مقیاس مطالعه وابسته است و رابطه یکنواختی میان گروه‌های شیمیایی خاک و تنوع گیاهی وجود ندارد (Hulshof and Spasojevic, 2020).

پاسخ گونه‌های گیاهی به شرایط محیطی معمولاً حاصل اثر هم‌زمان چندین عامل اقلیمی، توپوگرافی، خاکی و زیستی است و اهمیت نسبی این عوامل می‌تواند در مقیاس‌های مکانی و بین گونه‌های مختلف متفاوت باشد. در مورد *Gundelia tournefortii* نیز مطالعات پیشین ارتباط این گونه را با مجموعه‌ای از عوامل اقلیمی، توپوگرافی و خاکی گزارش کرده‌اند (Farhang et al., 2017; Salehi Ardali et al., 2017). بنابراین، مشاهده ارتباط یک ویژگی محیطی با یک گونه یا یک صفت، لزوماً به معنای آن نیست که همان عامل بتواند به‌تنهایی تغییرات زیست‌توده یا غنای گونه‌ای را در مقیاس‌های دیگر توضیح دهد. این موضوع ضرورت بررسی هم‌زمان چندین عامل محیطی را در تفسیر پاسخ پوشش گیاهی نشان می‌دهد. همچنین در مراتع ایران، توپوگرافی، بافت خاک و چرا از عوامل مؤثر بر کمیت و کیفیت پوشش گیاهی گزارش شده‌اند (Sanaei et al., 2019). بنابراین، نبود تفاوت معنی‌دار میان گروه‌های شیمیایی خاک می‌تواند

نشان‌دهنده آن باشد که تفاوت در کربن آلی، فسفر و پتاسیم، در حضور سایر عوامل محیطی، به‌تنهایی برای توضیح تغییرات زیست‌توده کافی نبوده است. از این‌رو، ارزیابی گسترده‌تر «کیفیت خاک» با در نظر گرفتن ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و در صورت امکان ویژگی‌های زیستی خاک، می‌تواند در مطالعات آینده شناخت دقیق‌تری از محدودیت‌های ادافیکی فراهم کند.

رابطه شاخص خشکی دومارتن با میانگین وزن خشک نیز معنی‌دار نبود و مدل رگرسیون تنها بخش محدودی از تغییرات وزن خشک بین رویشگاه‌ها را توضیح داد ($R^2 = 0.094$, $P = 0.388$). این نتیجه نباید به‌عنوان نبود اثر خشکی یا آب بر زیست‌توده *G. tournefortii* تفسیر شود؛ بلکه نشان می‌دهد شاخص خشکی سالانه دومارتن، در مقیاس و دامنه محیطی این مطالعه، شاخص کافی برای توضیح تغییرات زیست‌توده نبوده است. در اکوسیستم‌های خشک، پاسخ پوشش گیاهی می‌تواند به زمان‌بندی و توزیع فصلی بارش و همچنین ذخیره آب در خاک وابسته باشد و از این‌رو، الزاماً با یک شاخص اقلیمی سالانه رابطه خطی نشان نمی‌دهد (Vetter, 2005; Zhang et al., 2022). افزون بر این، پویایی مراتع خشک می‌تواند تحت تأثیر نوسان بارش و سایر عوامل غیرزیستی قرار گیرد (Vetter, 2005; von Wehrden et al., 2012).

برهم‌کنش شاخص خشکی و گروه‌های شیمیایی خاک نیز معنی‌دار نبود ($\chi^2 = 0.15$, $df = 2$, $P = 0.930$). بنابراین، در داده‌های این مطالعه شواهد کافی برای تعدیل رابطه میان خشکی و زیست‌توده توسط گروه‌های شیمیایی خاک مشاهده نشد. این نتیجه نشان می‌دهد که طبقه‌بندی سه‌گانه ویژگی‌های خاک بر اساس متغیرهای شیمیایی انتخاب‌شده، در دامنه مورد بررسی نتوانسته است تفاوت مشخصی در پاسخ زیست‌توده کنگر صحرایی در امتداد گرادیان خشکی آشکار کند. در مقابل، شواهد موجود در مراتع ایران بر اهمیت هم‌زمان عواملی مانند توپوگرافی، بافت خاک و چرا تأکید دارند (Sanaei et al., 2019). بنابراین، عوامل محلی ممکن است بخشی از تغییرات مشاهده‌نشده را توضیح دهند؛ هرچند سهم مستقل این عوامل در

مطالعه حاضر قابل تعیین نیست، زیرا در مدل‌های اصلی وارد نشده‌اند.

از دیدگاه کاربردی، یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که ارزیابی زیست‌توده و غنای گونه‌ای *G. tournefortii* در مراتع خشک را نمی‌توان صرفاً بر اساس یک شاخص خشکی سالانه و چند ویژگی شیمیایی خاک انجام داد. در مطالعات آینده، پیشنهاد می‌شود ویژگی‌های خاک با مجموعه گسترده‌تری از شاخص‌های فیزیکی، شیمیایی و در صورت امکان زیستی بررسی شوند و هم‌زمان متغیرهایی مانند رطوبت خاک، ظرفیت نگهداری آب، شدت چرا و ریزتوپوگرافی نیز اندازه‌گیری شوند. همچنین استفاده از متغیرهای اقلیمی با تفکیک زمانی بالاتر، به‌ویژه بارش و دما در دوره رشد، می‌تواند شناخت دقیق‌تری از ارتباط میان محدودیت آبی و زیست‌توده فراهم کند.

تفسیر نتایج باید با توجه به محدودیت‌های مطالعه انجام شود. رابطه خشکی و زیست‌توده در سطح ۱۰ رویشگاه بررسی شد. بنابراین، تعمیم این رابطه به مقیاس‌های منطقه‌ای باید با احتیاط صورت گیرد. افزون بر این، شاخص دومارتن بر اساس شرایط اقلیمی سالانه محاسبه شد و الزاماً بیانگر میزان آب در دسترس گیاه در دوره رشد و گل‌دهی نیست. مطالعه حاضر نیز مشاهده‌ای و مقطعی بود و متغیرهایی مانند رطوبت خاک، شدت چرا و ریزتوپوگرافی مستقیماً در مدل‌های اصلی وارد نشدند. همچنین گروه‌های شیمیایی خاک، طبقه‌بندی‌هایی نسبی و داده‌محور بودند و نباید به‌عنوان طبقات مطلق گروه‌های خاک تفسیر شوند.

در مجموع، نتایج نشان می‌دهد که در دامنه محیطی بررسی‌شده، شاخص خشکی سالانه و گروه‌های شیمیایی خاک نسبی خاک، به‌تنهایی یا در تعامل با یکدیگر، تغییرات زیست‌توده و غنای گونه‌ای را به‌طور معنی‌دار توضیح ندادند. از این‌رو، برای شناخت بهتر الگوهای زیست‌توده و غنای گونه‌ای *G. tournefortii* در مراتع خشک، توجه هم‌زمان به کیفیت خاک، آب در دسترس، توپوگرافی، آشفستگی و تغییرپذیری زمانی اقلیم ضروری است.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که در دامنه شرایط محیطی بررسی‌شده، زیست‌توده و غنای گونه‌ای *Gundelia tournefortii* را نمی‌توان تنها بر اساس شاخص خشکی سالانه یا گروه‌بندی نسبی برخی ویژگی‌های شیمیایی خاک توضیح داد. نبود تفاوت معنی‌دار میان گروه‌های شیمیایی خاک و همچنین نبود رابطه معنی‌دار میان شاخص دومارتن و زیست‌توده نشان می‌دهد که پاسخ این گونه و الگوی تنوع گیاهی احتمالاً تحت تأثیر مجموعه‌ای از عوامل محیطی و محلی قرار دارد. عواملی مانند ناهمگنی مکانی، توپوگرافی، ویژگی‌های فیزیکی خاک، رقابت گیاهی، شدت چرا و تغییرات زمانی آب در دسترس می‌توانند در کنار شرایط اقلیمی و شیمیایی خاک در شکل‌گیری این الگوها نقش داشته باشند.

با توجه به مشاهده‌ای و مقطعی بودن مطالعه، نتایج حاضر باید در محدوده رویشگاه‌ها و شرایط محیطی بررسی‌شده تفسیر شوند. برای ارزیابی دقیق‌تر پاسخ *G. tournefortii* در مراتع خشک، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده ویژگی‌های گسترده‌تری از کیفیت خاک، رطوبت و ظرفیت نگهداری آب خاک، ریزتوپوگرافی و شدت چرا، همراه با متغیرهای اقلیمی با تفکیک زمانی بالاتر، به‌صورت هم‌زمان بررسی شوند. چنین رویکردی می‌تواند درک دقیق‌تری از عوامل مؤثر بر زیست‌توده و غنای گونه‌ای این گونه در شرایط متغیر محیطی فراهم کند.

تشکر و سپاسگزاری

نویسندگان از دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، به‌پاس فراهم‌کردن بستر لازم برای انجام این پژوهش سپاسگزاری می‌کنند. این پژوهش هیچ‌گونه حمایت مالی خاصی از مؤسسات عمومی، صنعتی یا غیرانتفاعی دریافت نکرده است.

تضاد منافع

نویسندگان مقاله اذعان دارند هیچ‌گونه تضاد منفعی با شخص، شرکت یا سازمانی برای این پژوهش ندارند.

References

1. Azarmi-Atajan, F., Rostampour, M., 2025. Comparison of soil organic carbon, total nitrogen, and carbon to nitrogen ratio (C/N) in rangeland and desert habitats of South Khorasan province. *J. Soil Plant Interact.* 16 (2), 21–38. <https://doi.org/10.47176/jspi.16.2.21591>. (In Persian with English abstract)
2. Black, C.A., 1979. *Methods of Soil Analysis*. American Society of Agronomy, Madison, WI, pp. 771–1572.
3. Bolker, B.M., Brooks, M.E., Clark, C.J., Geange, S.W., Poulsen, J.R., Stevens, M.H.H., White, J.-S.S., 2009. Generalized linear mixed models: a practical guide for ecology and evolution. *Trends Ecol. Evol.* 24 (3), 127–135. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2008.10.008>.
4. Bremner, J.M., 1965. Total nitrogen. In: Black, C.A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis, Part II. Chemical Methods*. American Society of Agronomy, Madison, WI, pp. 1149–1178.
5. Brooks, M.E., Kristensen, K., van Benthem, K.J., Magnusson, A., Berg, C.W., Nielsen, A., Skaug, H.J., Mächler, M., Bolker, B.M., 2017. glmmTMB balances speed and flexibility among packages for zero-inflated generalized linear mixed modeling. *R J.* 9 (2), 378–400. <https://doi.org/10.32614/RJ-2017-066>.
6. Díaz, S., Kattge, J., Cornelissen, J.H.C., Wright, I.J., Lavorel, S., Dray, S., Reu, B., et al., 2016. The global spectrum of plant form and function. *Nature* 529, 167–171. <https://doi.org/10.1038/nature16489>.
7. Farhang, H.R., Vahabi, M.R., Allafchian, A.R., Tarkesh Esfahani, M., 2017. Effects of environmental conditions on phytochemical characteristics of *Gundelia tournefortii* L. in Chaharmahal Bakhtiari Province and south parts of Isfahan Province, Iran. *Rangeland* 11 (2), 258–273. (In Persian with English abstract)
8. Harrison, X.A., Donaldson, L., Correa-Cano, M.E., Evans, J., Fisher, D.N., Goodwin, C.E.D., Robinson, B.S., Hodgson, D.J., Inger, R., 2018. A brief introduction to mixed effects modelling and multi-model inference in ecology. *PeerJ* 6, e4794. <https://doi.org/10.7717/peerj.4794>.
9. Hulshof, C.M., Spasojevic, M.J., 2020. The edaphic control of plant diversity. *Global Ecol. Biogeogr.* 29, 1634–1650. <https://doi.org/10.1111/geb.13136>.
10. Karimzadeh, H.R., Farhang, H.R., Rahimmalek, M., Tarkesh Esfahani, M., 2023a. The role of dominant ecological features on the morphological alterations of reproductive organs of *Gundelia tournefortii* L. in Central Zagros, Iran. *Iran. J. Appl. Ecol.* 12 (1), 1–23. (In Persian with English abstract)
11. Karimzadeh, H.R., Farhang, H.R., Rahimmalek, M., Tarkesh Esfahani, M., 2023b. The role of some vegetation parameters of *Gundelia tournefortii* L. in controlling runoff generation and sediment yield based on rainfall simulation experiments in major habitats of Central Zagros, Iran. *Arabian J. Geosci.* 16, 523. <https://doi.org/10.1007/s12517-023-11582-3>.
12. Kaval, I., Behcet, L., Cakilcioglu, U., 2015. Survey of wild food plants for human consumption in Gecitli (Hakkari, Turkey). *Indian J. Tradit. Knowl.* 14 (2), 183–190.
13. Khalasi Ahvazi, L., Heshmati, G.A., Zoofan, P., Akbarlou, M., 2016. Habitat factors impact on nutritional values *Gundelia tournefortii* L. at phenological stages in the North East of Khozestan Province. *J. Plant Ecosyst. Conserv.* 4 (8), 30–48. (In Persian with English abstract)
14. Khojasteh, F., Zare Chahouki, M.A., 2013. Spatial patterns and coexistence of the native forb, *Psathyrostachys fragilis* (Asteraceae) and the native invader, *Gundelia tournefortii* (Poaceae) in a semi-arid rangeland of Iran. *Polish J. Ecol.* 61 (2), 373–377.
15. Khoshshima, E., Bakhshi Khaniki, G.R., Asri, Y., 2013. Study of ecological characteristics of *Capparis spinosa* L. and *Vitex agnus-castus* L. in Qom province. MSc Thesis, Payame Noor University, Tehran, Iran. (In Persian)
16. Olsen, S.R., Cole, C.V., Watanabe, F.S., Dean, L.A., 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. *USDA Circular* 939, 1–19.
17. R Core Team, 2025. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>.
18. Salehi Ardali, A., Vahabi, M.R., Tarkesh Esfahani, M., Pourmanafi, S., Ghehsareh Ardestani, E., Farhang, H.R., 2017. Investigation of environmental factors influence on *Gundelia tournefortii* L. distribution in Isfahan province, Iran. *J. Appl. Ecol.* 6 (3), 29–41. (In Persian with English abstract)
19. Sanaei, A., Li, M., Ali, A., 2019. Topography, grazing, and soil textures control over rangelands' vegetation quantity and quality. *Sci. Total Environ.* 697, 134153. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134153>.
20. Tabari, H., Hosseinzadeh Talaei, P., Mousavi Nadoushani, S.S., et al., 2014. A survey of temperature and precipitation based aridity indices in Iran. *Quat. Int.* 345, 158–166. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2014.03.061>.
21. Taleshi, H., Jalali, S.G., Alavi, S.J., et al., 2019. Climate change impacts on the distribution and diversity of plant species in Iran. *Reg. Environ. Change* 19 (8), 2711–2728. <https://doi.org/10.1007/s10113-019-01578-5>.
22. Vetter, S., 2005. Rangelands at equilibrium and non-equilibrium: recent developments in the debate. *J. Arid Environ.* 62 (2), 321–341. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2004.11.015>.
23. von Wehrden, H., Hanspach, J., Kaczensky, P., et al., 2012. Global assessment of the non-equilibrium concept in

rangelands. Ecol. Appl. 22 (2), 393–399. <https://doi.org/10.1890/11-0802.1>.

24. Walkley, A., Black, I.A., 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. Soil Sci. 37 (1), 29–38. <https://doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003>.

25. Zhang, Y., Gentine, P., Luo, X., et al., 2022. Increasing sensitivity of dryland vegetation greenness to precipitation due to rising atmospheric CO₂. Nat. Commun. 13, 4875. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-32631-3>.

نسخه پیش از انتشار (اصلاح نشده)