

الگوهای پراکنش فضایی ریشه‌ها و رقابت در گیاهان گون و کلاه‌میرحسن در مراتع شانجان شبستر با استفاده از نرم‌افزار پایتون

میثم علی‌زاده^۱ و قاسم حبیبی‌بی‌بالانی^{۲*}

(۱) دانش‌آموخته گروه کشاورزی، واحد شبستر، دانشگاه آزاد اسلامی، شبستر، ایران.

(۲) دانشیار گروه کشاورزی، واحد شبستر، دانشگاه آزاد اسلامی، شبستر، ایران. *رایانامه نویسنده مسئول مکاتبات: habibibibalani@iau.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۲۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۲۸

چکیده

رقابت ریشه‌ای به‌عنوان یکی از عوامل کلیدی در تعیین الگوهای پراکنش گیاهان و سازگاری آنها در اکوسیستم‌های مرتعی نقش به سزایی دارد. این پژوهش با هدف بررسی تاثیر رقابت ریشه‌ای و الگوی توزیع فضایی ریشه‌های دو گونه گون (*Astragalus sp.*) و کلاه‌میرحسن (*Acantholimon sp.*) در مراتع شانجان شبستر انجام شد. هدف اصلی مطالعه حاضر، تحلیل نحوه توزیع ریشه‌ها در لایه‌های مختلف خاک و تاثیر ویژگی‌های فیزیکی خاک بر رقابت آنها بود. نمونه‌برداری در پنج عمق مختلف (۰-۱۰، ۱۰-۲۰، ۲۰-۳۰، ۳۰-۴۰ و ۴۰-۵۰ سانتی‌متر) صورت گرفت و ویژگی‌های ریشه‌ای از جمله تعداد و قطر ریشه‌ها اندازه‌گیری شد. رقابت ریشه‌ها با استفاده از تابع همبستگی نشان‌دار و استخراج شاخص رقابت تحلیل شد. ویژگی‌های فیزیکی خاک از جمله بافت، رطوبت و مواد آلی نیز اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد تعداد ریشه‌ها در هر دو گونه با افزایش عمق کاهش می‌یابد، به‌ویژه در عمق‌های ۳۰-۵۰ سانتی‌متری که کاهش بیش از ۸۸ درصد در گونه گون و ۸۱/۶۷ درصد در گونه کلاه‌میرحسن مشاهده شد. در گونه گون، بیشترین تراکم ریشه در لایه سطحی (۰-۱۰ سانتی‌متر) با میانگین ۵۰ ریشه در واحد سطح ثبت شد، درحالی‌که در گونه کلاه‌میرحسن، این مقدار ۶۰ بود. توزیع ریشه‌ها در گونه گون روند کاهشی یکنواختی داشت، اما در گونه کلاه‌میرحسن، کاهش شدیدتری در عمق‌های پایین‌تر مشاهده شد. قطر ریشه‌ها در گونه گون با افزایش عمق افزایش یافت و در عمق ۴۰-۵۰ سانتی‌متری به بیشترین مقدار خود (۱/۲۱ میلی‌متر) رسید، درحالی‌که در گونه کلاه‌میرحسن، بیشترین میانگین قطر ریشه‌ها در عمق ۰-۱۰ سانتی‌متری (۰/۸۳ میلی‌متر) مشاهده شد و سپس کاهش یافت. تحلیل رقابت نشان داد گونه کلاه‌میرحسن رقابت ریشه‌ای شدیدتری نسبت به گونه گون دارد، به‌ویژه در لایه‌های سطحی که شاخص رقابت بیشتر بود. در عمق‌های پایین‌تر، به‌دلیل کاهش تراکم ریشه‌ها و دسترسی بیشتر به منابع، شدت رقابت کاهش یافت. همچنین نتایج نشان داد بافت خاک و رطوبت تاثیر قابل توجهی بر توزیع ریشه‌ها و شدت رقابت دارند، به طوری‌که در خاک‌هایی با بافت سنگین‌تر و رطوبت بیشتر، تراکم ریشه‌ها و شدت رقابت افزایش می‌یابد. در نهایت این یافته‌ها نشان داد گونه‌های مختلف راهبردهای متفاوتی برای رشد ریشه در پاسخ به رقابت و دسترسی به منابع در لایه‌های خاک اتخاذ می‌کنند. نتایج این پژوهش می‌تواند در مدیریت مراتع، بهبود راهبردهای احیای پوشش گیاهی و افزایش بهره‌وری اکوسیستم‌های مرتعی، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: پراکنش فضایی ریشه‌ها، رقابت ریشه‌ها، گون، کلاه‌میرحسن، نرم‌افزار پایتون.

تعیین عوامل موثر در چگونگی پراکندگی ریشه در خاک و شیوه استقرار آنها در کنار هم دارای اهمیت ویژه‌ای است. این پراکندگی و استقرار می‌تواند در میزان افزایش مقاومت خاک به فرسایش و لغزش تاثیرگذار باشد (Silva & Rego, 2003). یکی از عوامل موثر در این پراکندگی، رقابت بین ریشه‌های گیاه و همچنین افزایش عمق خاک است. عمق خاک می‌تواند بر ساختار مسلح‌سازی خاک توسط ریشه‌ها تاثیرگذار باشد. با تعیین موقعیت مکانی و قطر ریشه‌ها در تراشه خاک می‌توان به بسیاری از موارد ابهام‌زا مانند اثرات آنها بر میزان افزایش مقاومت مکانیکی خاک پاسخ داد (Abdi et al., 2009). در این زمینه، بررسی‌ها بر روی درختان جوان و بالغ گونه *Populus tomentosa* حاکی از آن بود که در درختان جوان، ساختار ریشه‌ای نقش تعیین‌کننده‌ای در نحوه برداشت آب دارد، درحالی‌که در درختان بالغ، دسترسی به منابع آبی نقش مهم‌تری ایفا می‌کند. این تفاوت عملکرد می‌تواند در تحلیل نقش ریشه‌ها در پایداری مکانیکی خاک نیز اثرگذار باشد (Zhu et al., 2024).

بررسی و تحلیل پراکندگی ریشه در خاک می‌تواند به‌صورت تک‌بعدی (مانند تعداد ریشه‌ها در طبقات قطری مختلف)، دو بعدی (چگونگی پراکندگی ریشه‌ها در اعماق مختلف خاک)، یا سه‌بعدی (پراکندگی طبقات مختلف قطری ریشه‌ها در اعماق مختلف خاک) صورت گیرد (Carvalho et al., 2024). در این حالت، اطلاعات موقعیت قرارگیری ریشه در خاک همراه با ویژگی‌های دیگر ریشه مانند قطر و سطح مقطع ریشه‌ها تجزیه و تحلیل می‌شود. برای تجزیه و تحلیل این چنین داده‌هایی از تابع همبستگی نشان‌دار استفاده می‌گردد که میزان رقابت و اثرات متقابل ریشه‌ها در کنار هم قرار گرفتن در خاک را بررسی می‌کند (Mulia & Dupraz, 2006). شواهد تجربی اخیر نیز حاکی از آن است که تفاوت‌های فضایی در امتداد محور ریشه می‌تواند بر نوع و میزان کلونی‌سازی میکروبی اثرگذار باشد. به‌عنوان مثال، در ریشه گیاه *Arabidopsis thaliana*، بخش‌های مختلف ریشه دارای جوامع باکتریایی متفاوتی هستند که با تفاوت در تجمع متابولیت‌ها و فعالیت‌های ژنتیکی در این بخش‌ها مرتبط است (Loo et al., 2024). این یافته‌ها بیانگر نقش ساختار فضایی

ریشه در شکل‌دهی به تعاملات بیولوژیکی با محیط اطراف، به‌ویژه در ارتباط با رقابت برای منابع و پایداری ریزویست‌بوم‌ها در خاک است. این تابع به بررسی شباهت یا عدم شباهت دو ریشه در کنار هم از نظر سطح مقطع یا قطر ریشه‌ها که در فاصله مشخص از هم در خاک قرار دارند، می‌پردازد تا به کمک آن به وجود یا عدم وجود رقابت بین ریشه‌ها پی برده شود (Manoli et al., 2014). Jakson و همکاران (۱۹۹۶) با مطالعه یازده زیست بوم متفاوت، توزیع ریشه‌ها را بر اساس عمق خاک مورد مطالعه قرار دادند. نتایج مطالعه نشان داد جنگل‌های معتدل دارای بالاترین مقدار توزیع ریشه‌ها و مراتع مناطق معتدل دارای کمترین مقدار این توزیع بودند.

بررسی‌های گسترده جهانی بر روی عمق برداشت آب گیاهان^۱ نشان می‌دهد تفاوت میان بیوم‌ها در این زمینه، بیشتر از تفاوت میان گروه‌های عملکردی گیاهان (مانند پهن‌برگ‌های خزان‌دار یا همیشه‌سبز) است. به‌ویژه در مناطق خشک، اگرچه عمق ریشه‌دوانی بیشتر است، اما برداشت آب عمدتاً از لایه‌های کم‌عمق‌تر خاک انجام می‌شود. این یافته‌ها نقش تعیین‌کننده اقلیم، به‌ویژه الگوی بارندگی فصلی را در رفتار ریشه‌ها برجسته می‌سازد و با یافته‌های پیشین در خصوص توزیع عمق ریشه‌ها در زیست‌بوم‌های مختلف هم‌راستا است (Bachofen et al., 2024). Gning و همکاران (۲۰۲۳) با مطالعه سه گونه درختی در مناطق ساحلی به این نتیجه رسیدند که پراکنش ریشه این گونه‌های مورد مطالعه به نوع خاک وابسته بوده و گونه *Borassus digitate* بیشترین تجمع ریشه‌ها در عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متر و دو گونه *B. akaassii* و *B. albidia* بیشترین تجمع ریشه‌ها را در عمق ۳۰ تا ۶۰ سانتی‌متری نشان دادند. همچنین، بیوماس ریشه‌ها با افزایش فاصله درختان به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد.

یافته‌های مربوط به پراکندگی ریشه و عملکرد آن در خاک، در ارتباط تنگاتنگی با عملکردهای کلی اکوسیستم قرار دارد. بررسی عملکرد چندگانه اکوسیستم‌ها^۲ در مناطق خشک و مرطوب چین نشان داد ویژگی‌های اقلیمی مانند میانگین دمای

1. WUD

2. EMF

جمله گیاهان غالب در این منطقه، دو گونه گیاهی گون (*Astragalus sp.*) و کلاه‌میرحسن (*Acantholimon sp.*) هستند که در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفته‌اند. علاوه بر این، گونه‌های دیگر مانند *Festuca ovina* و *Dactylis glomerata* نیز در این مراتع به‌طور پراکنده وجود دارند. این گیاهان به‌ویژه در لایه‌های سطحی خاک رشد کرده و در مقابل فشارهای محیطی مانند خشکی و کمبود منابع آب، سازگاری بالایی از خود نشان می‌دهند. در منطقه مورد مطالعه هشت بوته گون و هشت بوته کلاه‌میرحسن که دارای متوسط دو قطر حداقل و حداکثر عمود بر هم به‌ترتیب ۱۰ و ۵۰ سانتی‌متر بودند انتخاب و در ۳۰ سانتی‌متری سایه‌انداز به سمت شمال تاج بوته‌های مورد مطالعه پروفیلی به عمق پلات نمونه‌برداری مربعی با ابعاد ۵۰ سانتی‌متر به‌منظور نمونه‌برداری ریشه نصب گردید و اقدام به تصویربرداری از فاصله ۷۰ سانتی‌متری به دوربین Canon گردید.

اندازه‌گیری در قطعات نمونه: قطر ریشه‌های مشاهده‌شده در پروفیل ایجاد شده توسط نرم‌افزار ImageJ اندازه‌گیری شد. به‌منظور تعیین مختصات دکارتی هر ریشه اندازه‌گیری‌شده، اقدام به اندازه‌گیری فاصله از مبدا (کنج بالا و سمت چپ پلات نمونه‌برداری) شد که توسط کد پایتون زیر که توسط نویسندگان این مقاله توسعه داده شده، مختصات دکارتی هر ریشه تعیین گردید (Muhandiram Karunarathne et al., 2024). در این مطالعه تمام ریشه‌های دارای قطر بیش از یک‌دهم میلی‌متر تا دو سانتی‌متر اندازه‌گیری گردید و جدول فراوانی هر یک از پلات‌های نمونه‌برداری برای گونه‌های مورد مطالعه بر اساس چهار طبقه قطری ۰/۵-۱، ۱-۰/۵، ۱/۵-۱ و ۱-۱/۵ سانتی‌متری در طبقات عمقی ۰-۱۰، ۱۰-۲۰، ۲۰-۳۰، ۳۰-۴۰ و ۴۰-۵۰ سانتی‌متری توسط کد پایتون زیر که توسط نویسندگان مقاله توسعه داده شده (کد شماره (۱))، تهیه شد.

سالانه و شاخص‌های خاک و پوشش گیاهی، از جمله عوامل اصلی تعیین‌کننده در تفاوت‌های مشاهده‌شده در عملکرد اکوسیستم‌ها هستند. این نتایج می‌تواند مکمل مطالعات پراکنندگی ریشه در گونه‌های مختلف و شرایط محیطی گوناگون باشد و دیدگاه جامع‌تری از پاسخ‌های عملکردی گیاهان را ارائه دهد (Zhang et al., 2024a). Abdi و همکاران (۲۰۱۰) در مطالعه خود بر روی ۲۴ درخت در جنگل با شیب ملایم به این نتیجه رسیدند که با افزایش عمق خاک، مقدار مساحت ریشه در واحد سطح کاهش می‌یابد. Grant و همکاران (۲۰۱۰) در مطالعه ریشه‌های درختان صنوبر در نیوزلند به این نتیجه رسیدند که بیش از ۸۰ درصد ریشه‌های این درختان دارای قطر کمتر از ۵ میلی‌متر بوده و در عمق ۹۰ سانتی‌متری خاک، تراکم ریشه‌ها بیشترین مقدار را دارد. با توجه به پیشینه پژوهش ذکر شده در خصوص اثرات افزایش عمق در پراکنندگی ریشه گیاهان، هدف اصلی این تحقیق بررسی اثرات رقابتی ریشه‌های گونه‌های گیاهی کلاه‌میرحسن و گون در پراکنندگی ریشه‌ها در عمق خاک است. به‌ویژه، هدف بررسی این اثرات از طریق تابع همبستگی نشان‌دار و کمی کردن اثرات رقابت بر این دو گونه در مراتع شانجان شبستر می‌باشد.

مواد و روش‌ها

داده‌های مورد استفاده این پژوهش از مراتع شانجان شبستر واقع در حدود ۱۰ کیلومتری شمال‌غربی روستای شانجان با عرض جغرافیایی ۳۸ درجه، ۱۴ دقیقه و ۱۴ ثانیه و طول جغرافیایی ۴۵ درجه، ۴۱ دقیقه و ۲۱ ثانیه در منطقه حفاظت‌شده میشو گرفته شد. خاک منطقه مورد مطالعه دارای بافت لومی-رسی است. پوشش گیاهی مراتع منطقه مورد مطالعه شامل انواع گیاهان بومی و سازگار با شرایط اقلیمی خشک و نیمه‌خشک است. در این مناطق، گونه‌های گیاهی مختلفی از جمله انواع گندمیان و بوته‌ها مشاهده می‌شود. از

```
import pandas as pd

# Define diameter and depth class ranges
class_ranges = [(0.1, 0.5), (0.5, 1), (1, 1.5), (1.5, 2)]
depth_ranges = [(0, 10), (10.1, 20), (20.1, 30), (30.1, 40), (40.1, 50)]

# Define categorization function for a specific value
def categorize(value, ranges):
    for i, (low, high) in enumerate(ranges):
        if low <= value <= high:
            return f"Class_{i+1} ({low}-{high})"
    return "Out_of_range"

# Read the CSV file
data = pd.read_csv("All_roots____Astragalus_sp_Plot_1.csv")

# Add new columns for categorized diameter and depth
data["Diameter_Class"] = data["Root_Diameter"].apply(lambda x: categorize(x,
class_ranges))
data["Depth_Class"] = data["Depth"].apply(lambda x: categorize(x, depth_ranges))

# Create a frequency table (pivot table)
frequency_table = pd.pivot_table(
    data,
    index="Depth_Class",
    columns="Diameter_Class",
    aggfunc="size",
    fill_value=0
)

# Print the frequency table
print(frequency_table)

# Save the frequency table to a CSV file
frequency_table.to_csv("Frequency_Table.csv")
import pandas as pd
import numpy as np

# بارگذاری داده‌ها از فایل CSV
file_path = "All_roots____Acantholimon_sp_Plot_1.csv" # شما CSV مسیر فایل
data = pd.read_csv(file_path)

# تعریف دسته‌بندی‌های قطری و عمق
diameter_bins = [0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0] # دسته‌بندی قطر
depth_bins = [0, 10, 20, 30, 40, 50] # دسته‌بندی عمق

diameter_labels = ["0.1-0.5", "0.5-1.0", "1.0-1.5", "1.5-2.0"]
depth_labels = ["0-10", "10-20", "20-30", "30-40", "40-50"]

# گروه‌بندی قطر و عمق
data['Diameter_Group'] = pd.cut(data['Root_Diameter'], bins=diameter_bins,
labels=diameter_labels)
data['Depth_Group'] = pd.cut(data['Depth'], bins=depth_bins, labels=depth_labels)

# محاسبه فراوانی و درصد برای هر دسته
result = data.groupby(['Diameter_Group', 'Depth_Group']).size().unstack(fill_value=0)
percentages = result.div(result.sum(axis=1), axis=0) * 100

# ترکیب فراوانی و درصد در یک جدول
final_table = pd.concat([result, percentages], keys=['Frequency', 'Percentage'], axis=1)

# نمایش جدول نهایی
print(final_table)
```

ذخیره جدول نهایی به فایل CSV

final_table.to_csv("output_table.csv")

ندارد. در صورتی که این نمودار پایین تر از حد پایین مونت کارلو باشد، نشان دهنده رقابت بین ریشه ها است. همچنین، اگر نمودار در بازه بین حد بالا و پایین مونت کارلو قرار گیرد، به این معنی است که ریشه ها از هم مستقل هستند. در این پژوهش، مارک های مورد استفاده همان قطر ریشه ها در دو گونه گیاهی گون و کلاه میرحسن هستند. محاسبات مونت کارلو با ۱۰۰ بار شبیه سازی انجام شد که توسط کد پایتون به طور خاص برای این پژوهش نوشته شده، انجام شده و فاصله محاسبات تا ۲۵ سانتی متر (نصف طول پلات نمونه برداری) محاسبه گردیده است.

تابع همبستگی نشان دار^۱: در این پژوهش، برای تعیین همبستگی بین قطر ریشه ها در قطعات نمونه برداری از تابع همبستگی نشان دار استفاده شد. این تابع کمک می کند تا رابطه مکانی بین ریشه ها بررسی شود. در واقع، برای هر نمونه ریشه، علاوه بر عمق و عرض که موقعیت ریشه ها در خاک را مشخص می کند، قطر ریشه ها نیز در نظر گرفته می شود. در این روش، هدف اصلی بررسی میزان همبستگی (یا رابطه) بین قطرهای دو ریشه است که در فاصله مشخصی از هم قرار دارند. به عبارت دیگر، تابع همبستگی نشان دار بررسی می کند که آیا قطر ریشه ها در کنار هم مشابه هستند یا خیر. این همبستگی به کمک یک رابطه ساده (۱) به صورت کمی سنجیده می شود (Rostamikia, 2020؛ کریمی نژاد و همکاران، ۱۳۹۶):

$$f(m_1, m_2) = m_1 \cdot m_2 \quad \text{رابطه (۱)}$$

m_1 و m_2 به معنی قطر دو ریشه هستند که فاصله مشخصی از هم دارند.

نتیجه این محاسبات در قالب مقدار $k_{mm}(d)$ بیان می شود. این مقدار نشان دهنده میانگین همبستگی برای ریشه ها در فاصله d از یکدیگر است. اگر مقدار $k_{mm}(d)$ بیشتر از ۱ باشد، نشان دهنده همبستگی مثبت است، به این معنی که قطر ریشه ها مشابه هم هستند. اگر مقدار آن کمتر از ۱ باشد، یعنی قطر ریشه ها با هم تفاوت دارند و همبستگی منفی است. وقتی مقدار $k_{mm}(d)$ برابر ۱ باشد، به این معنی است که ریشه ها از هم مستقل هستند.

برای بررسی معنی داری این همبستگی از آزمون مونت کارلو استفاده شد. این آزمون به طور شبیه سازی انجام می شود و کمک می کند تا تشخیص داده شود آیا همبستگی بین قطر ریشه ها به طور تصادفی رخ داده است یا خیر. اگر نمودار تابع MCF بالاتر از حد بالایی مونت کارلو قرار گیرد، به این معنی است که ریشه ها با هم همکاری می کنند و رقابتی وجود

```

import numpy as np # Importing NumPy for numerical operations
import pandas as pd # Importing pandas for data manipulation
import matplotlib.pyplot as plt # Importing Matplotlib for plotting
from scipy.spatial import KDTree # Importing KDTree for spatial queries
import os # Importing os for interacting with the operating system

# و تعداد تکرارهای تصادفی (MCF) تعریف فاصله‌ها برای محاسبه تابع همبستگی مارک
distances = np.linspace(0, 25, 100) # MCF فاصله‌ها برای محاسبه
random_iterations = 100 # تعداد تکرارهای شبیه‌سازی مونت کارلو

# (MCF) تابع برای محاسبه تابع همبستگی مارک
def mark_correlation_function(data, distances, random_iterations):
    coords = data[['x', 'Depth']].values # استخراج مختصات x و Depth
    marks = data['Root_Diameter'].values # استخراج قطر ریشه به عنوان علامت‌ها
    tree = KDTree(coords) # ساخت درخت KD برای پرس و جویهای فضایی
    observed_mcf = [] # مشاهده شده MCF لیست برای ذخیره مقادیر

    # مشاهده شده MCF محاسبه
    for d in distances:
        pairs = tree.query_pairs(d) # دریافت جفت نقاط با فاصله d
        similarities = [marks[i] * marks[j] for i, j in pairs] # محاسبه شباهت‌ها
        observed_mcf.append(np.mean(similarities) if similarities else 0) # میانگین شباهت برای فاصله

    # شبیه‌سازی مونت کارلو
    random_mcfs = [] # های تصادفی MCF لیست برای ذخیره
    for _ in range(random_iterations):
        np.random.shuffle(marks) # جابجایی تصادفی قطر ریشه‌ها
        random_mcf = [] # تصادفی برای این تکرار MCF لیست برای ذخیره
        for d in distances:
            pairs = tree.query_pairs(d) # دریافت جفت‌های نقاط با فاصله d
            similarities = [marks[i] * marks[j] for i, j in pairs] # محاسبه شباهت‌ها
            random_mcf.append(np.mean(similarities) if similarities else 0) # میانگین شباهت‌ها
        random_mcfs.append(random_mcf) # تصادفی برای این تکرار MCF ذخیره

    # numpy های تصادفی به آرایه MCF تبدیل لیست
    random_mcfs = np.array(random_mcfs)
    mean_random_mcf = random_mcfs.mean(axis=0) # های تصادفی MCF میانگین
    std_random_mcf = random_mcfs.std(axis=0) # های تصادفی MCF انحراف معیار
    return distances, observed_mcf, mean_random_mcf, std_random_mcf

# تعریف محدوده‌های عمق برای تجزیه و تحلیل
depth_ranges = [(0, 10), (10.1, 20), (20.1, 30), (30.1, 40), (40.1, 50)]

# پردازش فایل
try:
    # بارگذاری داده‌ها از فایل CSV
    data = pd.read_csv(file_path)

    # پردازش داده‌ها برای هر محدوده عمق
    for depth_range in depth_ranges:
        # فیلتر کردن داده‌ها بر اساس محدوده عمق فعلی
        filtered_data = data[(data['Depth'] >= depth_range[0]) & (data['Depth'] <= depth_range[1])]
        if len(filtered_data) > 0: # بررسی وجود داده‌ها در محدوده عمق
            # اجرای تحلیل برای محاسبه MCF
            distances, observed_mcf, mean_random_mcf, std_random_mcf = mark_correlation_function(
                filtered_data, distances, random_iterations
            )

            # MCF ایجاد نمودار برای
            plt.figure(figsize=(10, 6))
            plt.plot(distances, observed_mcf, label="Observed MCF", color="blue") # مشاهده شده MCF نمودار

```

```

plt.plot(distances, mean_random_mcf, label="Mean Random MCF", color="green",
linestyle="--") # تصادفی نمودار MCF
plt.fill_between(
    distances,
    mean_random_mcf - 2 * std_random_mcf, # حد پایین بازه اطمینان ۹۵٪
    mean_random_mcf + 2 * std_random_mcf, # حد بالای بازه اطمینان ۹۵٪
    color="green",
    alpha=0.2,
    label="Confidence Interval (95%)"
)
plt.axhline(y=1, color='red', linestyle='-', label="No Correlation") # خط مرجع برای عدم همبستگی
plt.xlabel("Distance (cm)") # برچسب محور X
plt.ylabel("MCF") # برچسب محور Y
plt.legend() # نمایش راهنما
plt.title(f"Mark Correlation Function (MCF) - Depth Range {depth_range[0]}-{depth_range[1]} cm - {file_path}")

# به عنوان متن روی نمودار MCF افزودن مقادیر
plt.text(
    0.8, 0.9, f"Observed MCF: {np.mean(observed_mcf):.2f}",
    horizontalalignment='center', verticalalignment='center',
    transform=plt.gca().transAxes, color="blue"
)
plt.text(
    0.8, 0.85, f"Mean Random MCF: {np.mean(mean_random_mcf):.2f}",
    horizontalalignment='center', verticalalignment='center',
    transform=plt.gca().transAxes, color="green"
)

# ذخیره نمودار در پوشه خروجی
# output_file = os.path.join(output_folder,
f'{Species}__{base_name_1}_Frequency_per_diameter_and_depth_class.jpeg')

output_file = os.path.join(
    output_folder,
    f'{Species}__{base_name}__MCF__Depth_{depth_range[0]}_{depth_range[1]}_jpeg'
)
plt.savefig(output_file)
plt.show()
plt.close() # بستن نمودار برای آزادسازی حافظه
print(f"Saved plot for depth range {depth_range[0]}-{depth_range[1]} cm at
{output_file}")
else:
    print(f"No data found in depth range {depth_range[0]}-{depth_range[1]} cm for file
{file_path}")

except Exception as e:
    print(f"Error processing file {file_path}: {e}")

```

یافته‌ها

مورد مطالعه (گون و کلاه‌میرحسن) تعیین گردید. در جدول (۱) داده‌های کمی قطعات نمونه اندازه‌گیری شده برای این گونه‌های مورد مطالعه آمده است.

پس از نمونه‌برداری در کل تعداد ۱۵۵۰ و ۹۳۷ ریشه به ترتیب برای گون و کلاه‌میرحسن در ۱۶ قطعه نمونه‌برداری مربعی به ابعاد ۵۰ سانتی‌متر، اندازه‌گیری قطر و مختصات هر یک از ریشه‌ها نسبت به پلات (کنج بالا سمت چپ) برای گونه‌های

جدول ۱. اطلاعات کمی از قطعات نمونه برداری مربعی ۵۰ سانتی متری در عمق‌های مختلف خاک

گونه گیاهی	مشخصات	عمق ۰-۱۰	عمق ۱۰-۲۰	عمق ۲۰-۳۰	عمق ۳۰-۴۰	عمق ۴۰-۵۰
گون	متوسط تعداد ریشه	۵۰	۵۳	۳۲	۲۷	۶
	میانگین قطر ریشه‌ها (mm)	۰/۹۹	۰/۸۷	۱/۰۳	۱/۱۷	۱/۲۱
	ضریب تغییرات قطر (%)	۴۵/۳۵	۴۸/۵۵	۴۸/۷۹	۲۷/۹۷	۲۸/۷۴
	انحراف معیار	۰/۴۵	۰/۴۲	۰/۵۰	۰/۳۳	۰/۳۵
کلاه‌میرحسن	متوسط تعداد ریشه	۶۰	۳۴	۲۵	۱۴	۱۱
	میانگین قطر ریشه‌ها (mm)	۰/۸۳	۰/۶۸	۰/۶۳	۰/۵۲	۰/۵۶
	ضریب تغییرات قطر (%)	۴۲/۲۸	۵۲/۶۶	۵۶/۰۳	۷۰/۹۴	۴۴/۸۳
	انحراف معیار	۰/۳۳	۰/۳۵	۰/۳۶	۰/۳۷	۰/۲۵

همان‌طور که در جدول (۱) مشاهده می‌شود، متوسط تعداد ریشه‌ها در هر دو گونه گیاهی گون و کلاه‌میرحسن با افزایش عمق خاک کاهش می‌یابد. این روند کاهشی در هر دو گونه به‌طور مداوم از عمق ۰-۱۰ سانتی‌متری تا عمق ۴۰-۵۰ سانتی‌متری قابل مشاهده است. برای گونه گون، بیشترین تعداد ریشه در عمق ۰-۱۰ سانتی‌متری (۵۰ ریشه) و کمترین آن در عمق ۴۰-۵۰ سانتی‌متری (۶ ریشه) ثبت شده است. برای گونه کلاه‌میرحسن نیز تعداد ریشه‌ها از ۶۰ ریشه در عمق ۰-۱۰ سانتی‌متری به ۱۱ ریشه در عمق ۴۰-۵۰ سانتی‌متری کاهش یافته است. این کاهش تدریجی نشان‌دهنده تمرکز بیشتر رشد ریشه‌ها در لایه‌های سطحی خاک است که احتمالاً به دلیل در دسترس بودن بهتر منابع غذایی و رطوبت در این لایه‌ها می‌باشد.

در مقابل، متوسط قطر ریشه‌ها در گونه گون با افزایش عمق خاک روند افزایشی نشان می‌دهد. در این گونه، کمترین میانگین قطر ریشه در عمق ۰-۱۰ سانتی‌متری (۰/۹۹ میلی‌متر) و بیشترین آن در عمق ۴۰-۵۰ سانتی‌متری (۱/۲۱ میلی‌متر) مشاهده شده است. این الگو می‌تواند به نقش ریشه‌های قطورتر در لایه‌های عمیق‌تر خاک برای تامین استحکام گیاه مرتبط باشد. برای گونه کلاه‌میرحسن، الگوی متفاوتی مشاهده می‌شود. در این گونه، بیشترین متوسط قطر ریشه‌ها در عمق‌های ۱۰-۲۰ و ۲۰-۳۰ سانتی‌متری ثبت شده است (به ترتیب ۰/۸۳ میلی‌متر و ۰/۶۸ میلی‌متر) و در عمق‌های بیشتر کاهش می‌یابد. این الگوی متفاوت می‌تواند نشان‌دهنده راهبرد رشد ویژه این گونه در استفاده از منابع موجود در لایه‌های میانی خاک باشد.

ضریب تغییرات قطر ریشه‌ها نیز در هر دو گونه تغییرات قابل توجهی نشان می‌دهد. برای گونه گون، بیشترین ضریب تغییرات در عمق‌های ۱۰-۲۰ و ۲۰-۳۰ سانتی‌متری (به ترتیب ۴۸/۵۵ و ۴۸/۷۹ درصد) ثبت شده است که این امر نشان‌دهنده ناهمگنی بالای قطر ریشه‌ها در این لایه‌ها است. در عمق‌های دیگر، ضریب تغییرات کاهش می‌یابد که می‌تواند بیانگر یکنواختی بیشتر در اندازه ریشه‌ها باشد. برای گونه کلاه‌میرحسن، بیشترین ضریب تغییرات قطر در عمق ۳۰-۴۰ سانتی‌متری (۷۰/۹۴ درصد) مشاهده می‌شود. این موضوع نشان می‌دهد که در این عمق، انواع مختلفی از ریشه‌ها شامل ریشه‌های نازک و قطور در کنار هم حضور دارند.

انحراف معیار قطر ریشه‌ها نیز اطلاعات مهمی درباره میزان پراکندگی اندازه ریشه‌ها در هر عمق ارائه می‌دهد. در گونه گون، بیشترین انحراف معیار در عمق ۲۰-۳۰ سانتی‌متری (۰/۵۰ میلی‌متر) و کمترین آن در عمق ۰-۱۰ سانتی‌متری (۰/۴۲ میلی‌متر) مشاهده می‌شود. این پراکندگی بالا در لایه‌های میانی خاک نشان‌دهنده رشد ترکیبی از ریشه‌های نازک و قطور در این عمق‌ها است. برای گونه کلاه‌میرحسن نیز انحراف معیار قطر در عمق‌های مختلف تفاوت دارد و بیشترین مقدار آن در عمق ۳۰-۴۰ سانتی‌متری (۰/۳۷ میلی‌متر) مشاهده می‌شود.

به‌طور کلی، نتایج نشان می‌دهند در هر دو گونه، توزیع تعداد و قطر ریشه‌ها در اعماق مختلف خاک با تغییراتی همراه است که احتمالاً به سازگاری‌های اکولوژیکی این گونه‌ها و نیازهای خاص آنها برای دسترسی به منابع خاکی در لایه‌های مختلف مرتبط است. در گونه گون، ریشه‌های قطورتر در لایه‌های

سانتی‌متر می‌باشد و برای گونه گون علاوه بر این مورد برای طبقه قطری ۱-۱/۵ سانتی‌متر در دو عمق ۰-۱۰ و ۳۰-۴۰ سانتی‌متری عمق خاک نیز دارای تراکم خوبی است. برای کلاه‌میرحسن با افزایش عمق تقریباً همه طبقات قطری از نظر تراکم روند کاهشی قابل ملاحظه‌ای دارند که نشان‌دهنده آن است (شکل ۱) که این گونه کمتر دارای ریشه‌های جانبی بوده و فقط در عمق ۱۰-۲۰ سانتی‌متر برای جذب مواد غذایی دارای ریشه‌های جانبی می‌باشد و بیشتر دارای ریشه‌های نفوذکننده به اعماق خاک می‌باشد که در پلات‌های عمود بر جهت ریشه‌های جانبی قابل مشاهده نمی‌باشد که از ویژگی‌های ریشه‌های نفوذکننده به اعماق زیاد خاک است.

عمیق‌تر توسعه یافته‌اند تا استحکام گیاه را تأمین کنند، درحالی‌که ریشه‌های نازک‌تر در لایه‌های سطحی به جذب مواد غذایی و آب کمک می‌کنند. برای گونه کلاه‌میرحسن، توسعه ریشه‌ها در لایه‌های میانی خاک می‌تواند به راهبرد ویژه این گونه در بهره‌گیری از منابع خاکی موجود در این عمق‌ها اشاره داشته باشد.

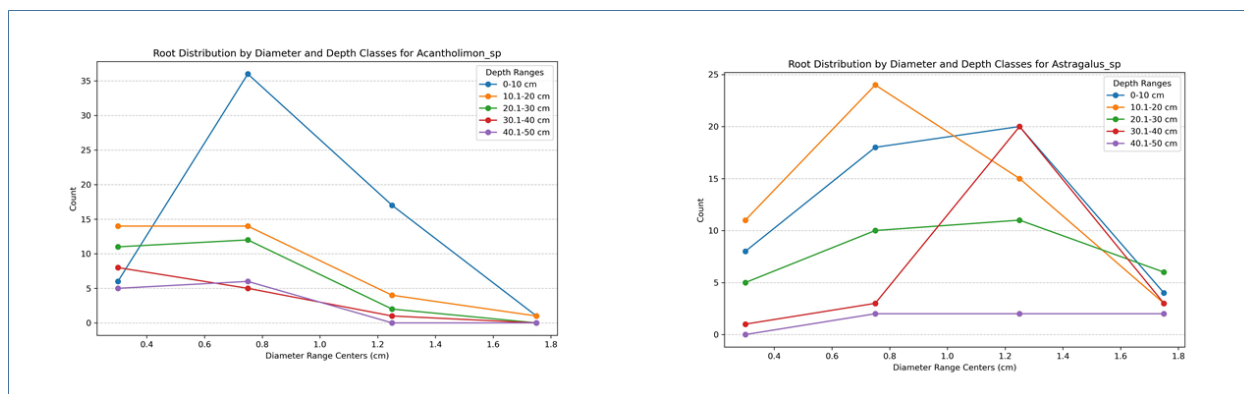
در جدول (۲) فراوانی ریشه‌های نمونه‌برداری شده در کلاسه‌های قطری ریشه در عمق‌های مختلف خاک برای دو گونه مورد مطالعه آمده است. همانگونه که مشاهده می‌شود بیشتر تجمع ریشه‌ها برای هر دو گونه مورد مطالعه در طبقه عمقی ۱۰-۲۰ سانتی‌متر و برای کلاس قطری ریشه ۱-۰/۵

جدول ۲. فراوانی، درصد و توزیع ریشه‌ها در کلاسه‌های مختلف قطری در اعماق مختلف خاک

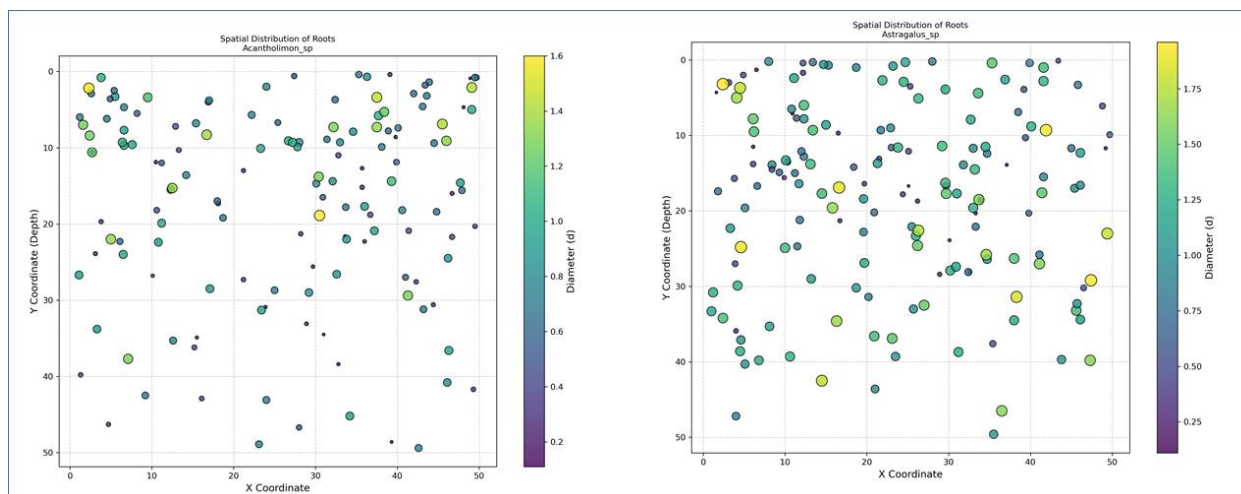
گونه گیاهی	طبقات مختلف قطری	عمق ۱۰-۰	عمق ۲۰-۱۰	عمق ۳۰-۲۰	عمق ۴۰-۳۰	عمق ۵۰-۴۰
		درصد	فراوانی	درصد	فراوانی	درصد
گون	۰/۱-۰/۵	۸	۳۲	۱۱	۴۴	۵
	۰/۵-۱	۱۸	۳۱/۵۷	۲۴	۴۲/۱۱	۱۰
	۱-۱/۵	۲۰	۲۹/۴۱	۱۵	۲۲/۰۶	۱۱
	۱/۵-۲	۲	۲۲/۲۲	۳	۱۶/۶۷	۶
کلاه‌میرحسن	۰/۱-۰/۵	۶	۱۳/۶۴	۱۴	۳۱/۸۲	۱۱
	۰/۵-۱	۳۶	۴۸/۶۵	۱۵	۲۰/۲۷	۱۲
	۱-۱/۵	۱۷	۷۰/۸۳	۴	۱۶/۶۷	۲
	۱/۵-۲	۱	۵۰	۱	۵۰	۰

گیاهی مورد مطالعه برای اعماق مختلف خاک نشان داده شده است.

در شکل (۱) نمودار پراکنش تعداد ریشه در طبقات قطری ریشه و در شکل (۲) وضعیت پراکنش ریشه‌ها برای دو گونه



شکل ۱. نمودار پراکنش تعداد ریشه در طبقات عمقی خاک برای هر یک از دو گونه مورد مطالعه



شکل ۲. توزیع مکانی ریشه‌های نمونه‌برداری شده در اعماق مختلف خاک برای دو گونه گیاهی مورد مطالعه (کلاه‌میرحسن و گون) به تفکیک کلاسه قطری ریشه

MCF به‌طور خفیف از مقدار تصادفی بالاتر می‌رود که می‌تواند ناشی از تجمع موضعی ریشه‌ها باشد. با این حال، قرارگیری نمودار در محدوده اطمینان ۹۵ درصد، نشان می‌دهد این تجمع به‌طور تصادفی اتفاق افتاده است. در فواصل میانی و بلندتر، الگوی توزیع فضایی به‌شدت تصادفی بوده و هیچ نوع همبستگی معنی‌داری در بین ریشه‌ها در این فاصله‌ها مشاهده نمی‌شود.

برای عمق ۲۰-۳۰ سانتی‌متری، روندی مشابه عمق‌های پیشین دیده می‌شود، به این معنی که در فواصل کمتر از ۲ سانتی‌متر، تجمع نسبی ریشه‌ها به‌طور خفیف رخ می‌دهد. این وضعیت نیز به‌دلیل قرار داشتن در محدوده اطمینان مونت‌کارلو، به‌صورت تصادفی ارزیابی می‌شود. اما در عمق ۳۰-۴۰ سانتی‌متری، الگوی تجمعی نسبی ریشه‌ها تا فواصل بیش از ۶ سانتی‌متر گسترش می‌یابد. این روند نشان می‌دهد که در این عمق، ریشه‌ها به‌صورت محلی و در فواصل بیشتری نسبت به اعماق کمتر به سمت خوشه‌بندی تمایل پیدا می‌کنند.

در عمق ۴۰-۵۰ سانتی‌متری، الگوی تجمع ریشه‌ها در فواصل کمتر از ۵ سانتی‌متر به‌طور آشکار دیده می‌شود. در این فواصل، مقادیر MCF از خط خنثی ۱ فاصله می‌گیرد که نشان‌دهنده وجود تجمع فضایی ریشه‌ها می‌باشد. این خوشه‌بندی می‌تواند ناشی از عوامل مختلفی از جمله رشد موضعی ریشه‌های فرعی، تمرکز در مناطق غنی از مواد مغذی و دسترسی محلی به آب‌های حاصل از نفوذ بارندگی باشد. در فواصل ۵ تا ۱۰ سانتی‌متر، نمودار به میانگین تصادفی

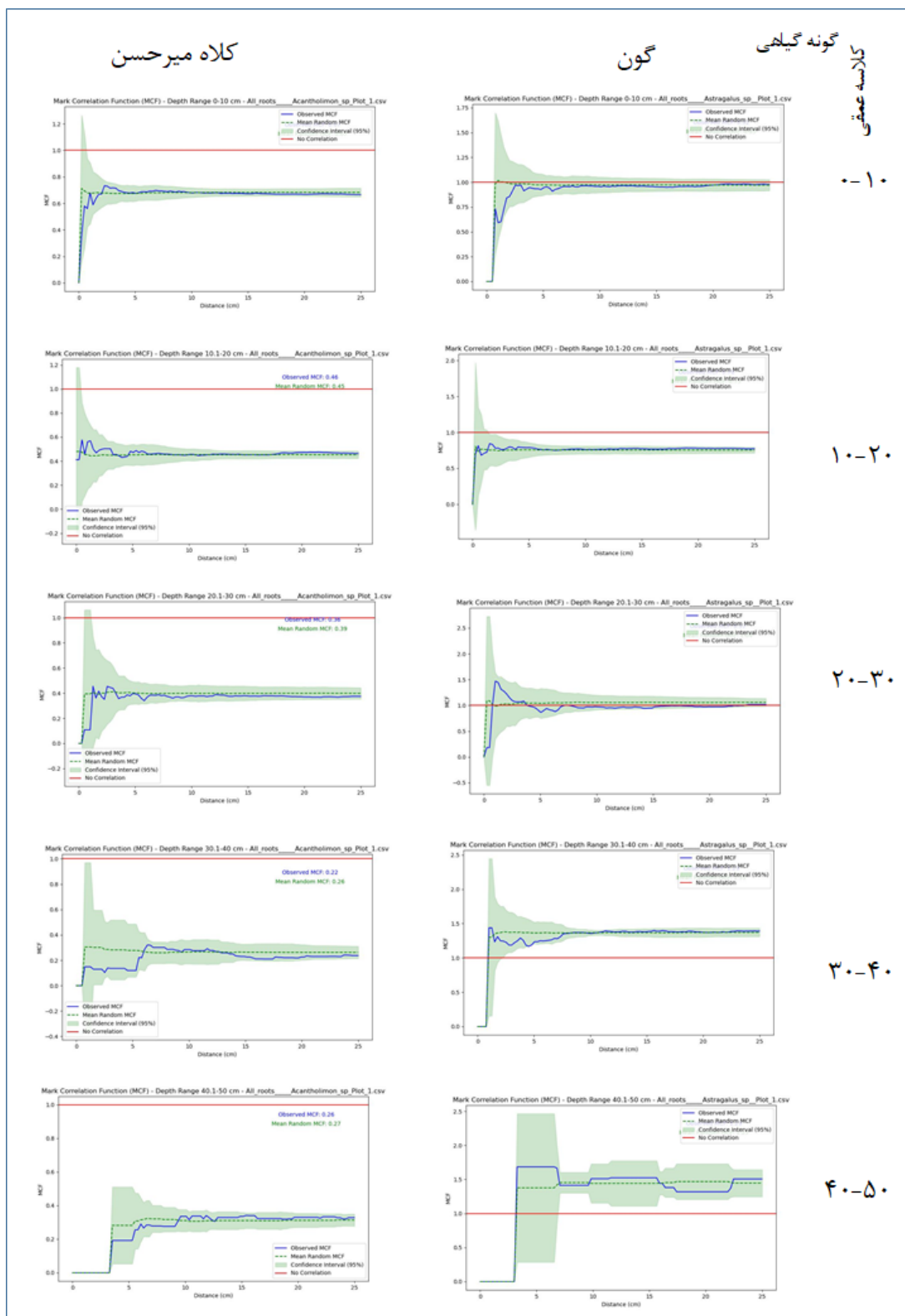
نمودارهای تابع همبستگی نشان‌دار برای دو گونه مورد مطالعه در طبقات مختلف عمقی خاک در شکل (۳) ارایه شده است. برای گونه کلاه‌میرحسن، بررسی نشان داد مقادیر MCF در تمام طبقات عمقی خاک کمتر از ۱ می‌باشد که این وضعیت بیانگر الگوی دفع فضایی است، به این معنی که ریشه‌ها از یکدیگر فاصله می‌گیرند و پراکندگی آنها از تجمع منظم جلوگیری می‌کند. علاوه بر این، قرارگیری مقادیر MCF در محدوده اطمینان ۹۵ درصدی مونت‌کارلو نشان داد الگوی دفع، به‌طور آماری به‌صورت تصادفی اتفاق می‌افتد و نتیجه دخالت عوامل محیطی یا بیولوژیکی خاص نمی‌باشد.

در عمق ۰-۱۰ سانتی‌متری، در فواصل کوتاه کمتر از ۲ سانتی‌متر، مقدار MCF روندی اندک بالاتر از میانگین تصادفی نشان می‌دهد که به‌صورت خفیف بیانگر تجمع فضایی ریشه‌ها در این فواصل است. این تجمع می‌تواند ناشی از تراکم طبیعی رشد ریشه‌های جوان یا محدودیت‌های فیزیکی خاک در عمق سطحی باشد. با این حال، نمودار در محدوده اطمینان مونت‌کارلو قرار دارد که این امر تصادفی بودن این تجمع را از لحاظ آماری تایید می‌کند. در فاصله ۵ تا ۱۵ سانتی‌متری، نمودار MCF به‌طور کامل با الگوی تصادفی مطابقت دارد. این وضعیت نشان‌دهنده پراکندگی فضایی ریشه‌ها به‌صورت کاملاً تصادفی در این فواصل است و عدم همبستگی معنی‌دار در این فاصله‌ها را تایید می‌کند.

در عمق ۱۰-۲۰ سانتی‌متری نیز شرایط مشابهی مشاهده می‌شود، به‌طوری که در فواصل کمتر از ۲ سانتی‌متر، مقادیر

میانگین تصادفی نزدیک و ثابت می‌ماند که این امر بیانگر عدم همبستگی فضایی و یک الگوی خنثی در این فاصله‌ها می‌باشد.

نزدیک شده و در محدوده اطمینان مونت کارلو قرار می‌گیرد که نشان‌دهنده توزیع نسبتاً تصادفی ریشه‌ها در این فواصل است. برای فواصل بیش از ۱۰ سانتی‌متر، مقادیر MCF به



شکل ۳. تابع همبستگی نشان‌دار برای قطر ریشه‌های نمونه‌برداری شده گونه‌های گیاهی مورد مطالعه در عمق‌های مختلف

(خط ممتد تابع نشان‌دار، خط قرمز افقی برابر عدد یک بدون همبستگی و مستقل، محدوده سبز رنگ حدود مونت کارلو)

به طور کلی، نتایج گونه کلاه میرحسن نشان داد در تمام طبقات عمقی خاک، گرایش به دفع فضایی ریشه‌ها غالب بوده و الگوی تجمع خفیف تنها در فواصل کوتاه قابل مشاهده است. این الگوی تجمع که در عمق‌های پایین‌تر وضوح بیشتری دارد، می‌تواند به دلیل رشد موضعی ریشه‌ها، تمرکز در مناطق غنی از منابع غذایی یا آب، و عوامل فیزیکی خاک باشد. با افزایش عمق خاک، تمایل به خوشه‌بندی در فواصل کوتاه‌تر به طور نسبی افزایش یافته و در فواصل بلندتر، الگوی توزیع به سمت تصادفی و خنثی میل می‌کند. این نتایج به طور مؤثری نشان می‌دهد با تغییر عمق خاک، الگوی توزیع فضایی ریشه‌ها و میزان تاثیرات اکولوژیکی و رقابتی در گونه کلاه میرحسن تغییر می‌یابد و می‌تواند دلالت‌هایی در زمینه تعاملات ریشه‌ها با محیط خاک ارایه دهد.

بررسی برای گونه گون در پنج عمق مختلف خاک مورد مطالعه، نشان داد برای عمق ۰ تا ۱۰ سانتی‌متری در فواصل کوتاه ۰ تا ۳ سانتی‌متر، مقادیر MCF به طور معنی‌داری بالاتر از خط تصادفی قرار دارد که نشان‌دهنده تجمع فضایی قوی و معنی‌دار ریشه‌ها در این فواصل است. این الگوی تجمع می‌تواند ناشی از تمرکز موضعی ریشه‌های جوان برای جذب منابع غذایی و رطوبت در لایه سطحی خاک باشد. در فواصل میانی ۳ تا ۸ سانتی‌متر، نمودار MCF به تدریج کاهش یافته و به محدوده تصادفی نزدیک می‌شود که این روند نشان‌دهنده توزیع نسبتاً تصادفی ریشه‌ها در این مقیاس است. در فواصل بلندتر ۸ تا ۱۵ سانتی‌متری، مقادیر MCF به مقدار ۱ میل می‌کند و در بازه تصادفی قرار می‌گیرد که این وضعیت بیانگر عدم همبستگی فضایی و یک الگوی خنثی در این فواصل است.

در عمق ۱۰ تا ۲۰ سانتی‌متری، فواصل کوتاه ۰ تا ۲ سانتی‌متر همچنان مقادیر MCF بالاتر از خط تصادفی قرار می‌گیرد و نشان‌دهنده تجمع فضایی ضعیف ریشه‌ها در مقیاس‌های کوچک است. این تجمع می‌تواند ناشی از تراکم کمتر ریشه‌ها نسبت به عمق سطحی باشد. در فواصل میانی ۲ تا ۶ سانتی‌متر، مقادیر MCF به محدوده تصادفی نزدیک شده و توزیع ریشه‌ها به طور نسبی تصادفی می‌شود. در فواصل بلندتر ۶ تا ۱۵ سانتی‌متر، نمودار کاملاً در محدوده تصادفی قرار می‌گیرد و هیچ‌گونه همبستگی فضایی معنی‌داری مشاهده

نمی‌شود. این درحالی است که در عمق ۲۰ تا ۳۰ سانتی‌متری، در فواصل کوتاه ۰ تا ۲ سانتی‌متر، مقادیر MCF اندکی بالاتر از مقدار تصادفی قرار می‌گیرد که نشان‌دهنده تجمع فضایی ضعیف ریشه‌ها در این مقیاس است. این وضعیت می‌تواند ناشی از گسترش موضعی ریشه‌های فرعی باشد. در فواصل میانی و بلندتر ۲ تا ۱۵ سانتی‌متر، نمودار MCF به طور کامل در بازه تصادفی قرار گرفته و نشان‌دهنده توزیع خنثی و تصادفی ریشه‌ها در این مقیاس‌ها است.

در عمق ۳۰ تا ۴۰ سانتی‌متری، در فواصل کوتاه ۰ تا ۴ سانتی‌متر، مقادیر MCF به طور معنی‌داری بالاتر از خط تصادفی قرار می‌گیرد که این وضعیت نشان‌دهنده تجمع فضایی محلی و معنی‌دار ریشه‌ها در این مقیاس‌های کوتاه است. در فواصل میانی ۴ تا ۱۰ سانتی‌متر، مقادیر MCF به مقدار تصادفی نزدیک می‌شود و در بازه تصادفی قرار می‌گیرد که نشان‌دهنده توزیع نسبتاً خنثی و تصادفی ریشه‌ها در این فواصل است. در فواصل بلندتر ۱۰ تا ۱۵ سانتی‌متر، نمودار به طور کامل در بازه تصادفی قرار دارد و هیچ‌گونه همبستگی فضایی قابل توجهی مشاهده نمی‌شود.

در عمق ۴۰ تا ۵۰ سانتی‌متری، در فواصل کوتاه ۰ تا ۵ سانتی‌متر، مقادیر MCF به طور معنی‌داری از خط تصادفی بالاتر قرار می‌گیرد که نشان‌دهنده تجمع فضایی قوی و معنی‌دار ریشه‌ها در این فواصل است. این الگوی تجمع می‌تواند به دلیل تلاش گیاه برای جذب منابع محدودتر آب و مواد غذایی در این عمق باشد. در فواصل میانی ۵ تا ۱۰ سانتی‌متر، نمودار به سمت مقدار تصادفی میل می‌کند و در محدوده تصادفی قرار می‌گیرد که نشان‌دهنده توزیع نسبتاً تصادفی ریشه‌ها در این مقیاس است. در فواصل بلندتر ۱۰ تا ۱۵ سانتی‌متر، مقادیر MCF به مقدار ۱ تثبیت می‌شود و الگوی توزیع خنثی و عدم همبستگی فضایی تایید می‌شود.

تحلیل مقادیر MCF برای گونه گون نشان می‌دهد در عمق‌های کم‌تر (۰ تا ۲۰ سانتی‌متری)، تجمع فضایی ریشه‌ها در مقیاس‌های کوتاه مشاهده می‌شود که احتمالاً ناشی از تمرکز موضعی ریشه‌های جوان برای جذب منابع موجود در این عمق است. در عمق‌های میانی (۲۰ تا ۳۰ سانتی‌متری)، توزیع ریشه‌ها به طور عمده تصادفی و خنثی بوده و همبستگی فضایی معنی‌داری مشاهده نمی‌شود. در عمق‌های عمیق‌تر (۳۰

خاک قرار دارد. این یافته‌ها با مطالعه مشابهی که بر روی همین گونه‌ها انجام شده است همخوانی دارد، جایی که ویژگی‌های ریشه‌ای گونه گون و کلاه‌میرحسن در جذب فلزات سنگین نیز متفاوت عمل کرده و نشان‌دهنده راهبردهای خاص ریشه‌ای برای استفاده بهینه از منابع خاک است (Montazeri et al., 2018). این تفاوت در راهبردهای ریشه‌ای می‌تواند به نحوه پاسخ این گیاهان به تغییرات محیطی و رقابت زیرزمینی مربوط باشد که در مطالعه حاضر نیز مشاهده شده است.

توزیع تعداد ریشه‌ها: یکی از یافته‌های کلیدی این پژوهش کاهش تعداد ریشه‌ها با افزایش عمق خاک است. به‌ویژه در عمق‌های ۳۰-۴۰ سانتی‌متری و ۴۰-۵۰ سانتی‌متری این کاهش مشهود بود. در گونه گون، بیشترین تعداد ریشه‌ها در لایه‌های سطحی خاک (۰-۱۰ سانتی‌متر) مشاهده شد، درحالی‌که در گونه کلاه‌میرحسن نیز روند مشابهی مشاهده گردید، اما میزان کاهش تعداد ریشه‌ها در عمق‌های پایین‌تر در این گونه بیشتر بود. این نتایج نشان‌دهنده تمایل گیاهان به متمرکز کردن ریشه‌های خود در لایه‌های سطحی خاک است که منابع رطوبتی و غذایی بیشتری در دسترس است. تحقیقات مشابه بر روی گیاهان دیگر نیز نشان دادند پراکنش ریشه‌ها به‌ویژه در گیاهان دارویی مانند *Rosmarinus officinalis* تحت شرایط کم‌آبایی به این صورت است که رشد ریشه در لایه‌های سطحی افزایش یافته و در عمق‌های بیشتر کاهش می‌یابد (Asadi et al., 2018). بنابراین، الگوی پراکنش ریشه‌ها در گونه‌های گون و کلاه‌میرحسن با نتایج این پژوهش هم‌خوانی دارد و نشان‌دهنده اهمیت راهبردهای ریشه‌ای این گونه‌ها برای بهره‌برداری بهینه از منابع آبی و معدنی در شرایط خشک و نیمه‌خشک است.

توزیع قطر ریشه‌ها: در مورد قطر ریشه‌ها، الگوهای متفاوتی بین دو گونه مشاهده شد. در گونه گون، قطر ریشه‌ها با افزایش عمق خاک افزایش یافت و بیشترین قطر ریشه‌ها در عمق ۴۰-۵۰ سانتی‌متری (۱/۲۱ میلی‌متر) ثبت شد. این افزایش قطر نشان‌دهنده توانایی ریشه‌ها برای نفوذ به عمق‌های بیشتر و جذب منابع غذایی و آبی از لایه‌های عمیق‌تر خاک است. در مقابل، گونه کلاه‌میرحسن بیشترین قطر ریشه‌ها را در عمق‌های ۱۰-۲۰ و ۲۰-۳۰ سانتی‌متری نشان داد که این

تا ۵۰ سانتی‌متری)، تجمع فضایی ریشه‌ها مجدداً در مقیاس‌های کوتاه تقویت می‌شود که می‌تواند بیانگر تلاش ریشه‌ها برای دسترسی به منابع محدودتر آب و مواد غذایی در این لایه‌های خاک باشد. این الگوها نشان می‌دهد توزیع فضایی ریشه‌های گونه گون تحت تاثیر عوامل محیطی و اکولوژیکی نظیر دسترسی به منابع و ویژگی‌های فیزیکی خاک تغییر می‌کند.

نتایج تحلیل تابع همبستگی نشان‌دار برای دو گونه کلاه‌میرحسن و گون در عمق‌های مختلف خاک نشان داد الگوی توزیع فضایی ریشه‌ها تحت تاثیر عمق خاک و ویژگی‌های اکولوژیکی متفاوت است. برای کلاه‌میرحسن، در تمامی عمق‌ها، الگوی غالب دفع فضایی مشاهده شد و تجمع خفیف ریشه‌ها تنها در فواصل کوتاه (کمتر از ۲ سانتی‌متر) رخ داد که به‌طور آماری تصادفی ارزیابی می‌شود. با افزایش عمق (۴۰-۵۰ سانتی‌متر)، گرایش به تجمع نسبی در فواصل بلندتر (تا ۶ سانتی‌متر) افزایش یافت که می‌تواند ناشی از تمرکز منابع محدودیت‌های محیطی باشد. در مقابل، گون در عمق‌های سطحی (۰-۲۰ سانتی‌متر) تجمع فضایی معنی‌دار و قوی‌تری در فواصل کوتاه (۰-۳ سانتی‌متر) نشان داد، درحالی‌که در عمق‌های میانی (۲۰-۳۰ سانتی‌متر)، توزیع ریشه‌ها به‌طور عمده تصادفی بود. با افزایش عمق (۳۰-۵۰ سانتی‌متر)، مجدداً تجمع فضایی ریشه‌ها در مقیاس‌های کوتاه مشاهده شد که بیانگر تلاش گیاه برای دسترسی به منابع محدودتر در این لایه‌ها است. به‌طور کلی، گون تمایل بیشتری به تجمع موضعی در عمق‌های سطحی و عمیق نشان داد، درحالی‌که کلاه‌میرحسن الگوی دفع فضایی غالب‌تری داشت و تجمع خفیف ریشه‌ها محدود به فواصل کوتاه بود.

بحث و نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از پژوهش حاضر نشان‌دهنده تاثیرات رقابتی و راهبردهای مختلف ریشه‌ای دو گونه گیاهی گون (*Astragalus sp.*) و کلاه‌میرحسن (*Acantholimon sp.*) در مراتع شانجان شبستر است. تحلیل‌های مختلف نشان داد تعداد و قطر ریشه‌ها در هر دو گونه به‌طور قابل‌توجهی تحت تاثیر عمق خاک قرار دارد. این توزیع فضایی تحت تاثیر عوامل مختلفی از جمله رقابت ریشه‌ها و ویژگی‌های فیزیکی

الگو بیانگر راهبرد خاص این گونه برای استفاده از منابع خاک در لایه‌های میانه خاک است. این نتایج مشابه پژوهش انجام‌شده در مورد درخت بید (*Salix spp.*) است که نشان دادند افزایش قطر ریشه‌ها و تراکم آنها می‌تواند بر ویژگی‌های مکانیکی خاک، به‌ویژه مقاومت برشی تأثیرگذار باشد (Davoudi & Fatemi Aqda, 2009). در مطالعه حاضر نیز مشاهده شد الگوی توزیع قطر ریشه‌ها در عمق‌های مختلف می‌تواند بر مقاومت خاک در برابر فرسایش و لغزش تأثیر گذارد که به‌ویژه برای مدیریت مراتع و حفاظت از خاک اهمیت دارد. در شرایط خاک‌های نامساعد که با تنش‌های مختلف مانند کمبود آب، مواد مغذی یا آبرفتگی روبه‌رو هستند، استفاده از سیستم‌های کشاورزی متنوع با راهبردهای رشد ریشه‌ای مکمل می‌تواند نقش مهمی در بهینه‌سازی بهره‌برداری از منابع خاکی و کاهش رقابت زیرزمینی ایفا کند. به ویژه، استفاده از گیاهانی با ویژگی‌های ریشه‌ای متفاوت می‌تواند باعث تسهیل در جذب آب و مواد مغذی در عمق‌های مختلف خاک و بهبود عملکرد در شرایط تنش شود. این راهبردها می‌توانند به‌طور موثری توان گیاهان در مقابله با شرایط خشک و رقابت برای منابع محدود را افزایش دهند (Zhang et al., 2024b).

رقابت ریشه‌ها و همبستگی مکانی: استفاده از تابع همبستگی نشان‌دار برای بررسی رقابت ریشه‌ها در قطعات نمونه‌برداری نشان داد در عمق‌های مختلف خاک، رقابت بین ریشه‌ها در گونه کلاه‌میرحسن بیشتر از گونه گون بوده است. در عمق‌های سطحی‌تر (۰-۱۰ سانتی‌متر)، مقدار MCF در محدوده اطمینان مونت‌کارلو نشان‌دهنده پراکندگی تصادفی ریشه‌ها بود. اما در عمق‌های عمیق‌تر، این پراکندگی به‌طور مثبت افزایش یافته و نشان‌دهنده کاهش رقابت بین ریشه‌ها و گسترش بیشتر آنها در فواصل بیشتر از هم است. این یافته‌ها با مطالعه‌ای که توسط Casper و Jackson (۱۹۹۷) بر روی رقابت ریشه‌ها انجام شد، همخوانی دارد. این مطالعه نشان داد در شرایط رقابت شدید زیرزمینی، گیاهان معمولاً سعی می‌کنند الگوی پراکنش ریشه‌های خود را به‌گونه‌ای تغییر دهند که رقابت کمتری برای منابع ایجاد شود و بهره‌برداری بهینه از منابع خاک ممکن گردد.

پراکنش فضایی ریشه‌ها: الگوهای پراکنش فضایی ریشه‌ها تحت تأثیر رقابت ریشه‌ای و ویژگی‌های فیزیکی خاک قرار دارند. در گونه کلاه‌میرحسن در عمق‌های عمیق‌تر، رقابت شدیدتر بود و پراکنش فضایی ریشه‌ها به سمت دفع فضایی (دوری از یکدیگر) تمایل یافت. این الگو مشابه آن چیزی است که در پژوهش‌های دیگر مشاهده شده که در آن ریشه‌ها در شرایط رقابتی شدید، تمایل به پراکنده شدن در فواصل بیشتر از هم دارند تا بتوانند منابع خاک را به‌طور بهینه بهره‌برداری کنند (Casper & Jackson, 1997). در این پژوهش نیز مشاهده شد در عمق‌های بیشتر خاک، گیاهان سعی دارند با پراکنش ریشه‌ها در فواصل بیشتر، رقابت را کاهش دهند و منابع خاکی را به‌طور موثرتری مصرف کنند. نتایج پژوهش‌های اخیر نشان داده است الگوی توزیع ریشه‌ها در گیاهان مختلف به‌طور مستقیم بر جذب منابع خاک و پایداری اکوسیستم تأثیر دارد. به‌طور خاص، ریشه‌های گیاهان دو لپه‌ای تمایل به انباشت بیشتر در لایه‌های سطحی خاک دارند، درحالی‌که گیاهان تک‌لپه‌ای توزیع یکنواخت‌تری را در عمق خاک نشان می‌دهند (Fan et al., 2016). این یافته‌ها با نتایج مطالعه حاضر نیز همخوانی دارد، زیرا در گونه‌های گون و کلاه‌میرحسن مشاهده شد پراکنش ریشه‌ها در عمق‌های مختلف به‌عنوان یک راهبرد برای بهره‌برداری بهینه از منابع خاک و کاهش رقابت عمل می‌کند.

رقابت و نحوه سازگاری با شرایط محیطی: در هر دو گونه، روند کاهش تعداد ریشه‌ها با افزایش عمق خاک هم‌راستا با افزایش قطر ریشه‌ها بوده است. این امر نشان‌دهنده راهبردهای متفاوت رشد ریشه‌ها در شرایط مختلف است. به‌طور کلی، گونه گون تمایل دارد ریشه‌های ضخیم‌تری را در عمق‌های بیشتر گسترش دهد، درحالی‌که گونه کلاه‌میرحسن بیشتر به ایجاد ریشه‌های جانبی و نفوذ به لایه‌های میانه خاک پرداخته است. این تفاوت‌ها می‌تواند به سازگاری‌های متفاوت هر گونه با شرایط محیطی و رقابتی زیرزمینی برگردد. نتایج مطالعه حاضر نشان داد افزایش عمق نفوذ ریشه‌ها، ویژگی‌های آناتومیکی مناسب و فعالیت بالاتر ریشه‌ها، نقش مهمی در بهره‌برداری بهینه از منابع آب و افزایش کارایی جذب دارند (Li et al., 2024) که این یافته‌ها با الگوی مشاهده‌شده در گونه‌های گون و کلاه‌میرحسن نیز همخوانی دارد، زیرا هر دو

گونه با راهبردهای متفاوت ریشه‌ای سعی در کاهش رقابت و بهینه‌سازی استفاده از منابع خاکی در شرایط خشک دارند. تحقیقات نشان داده‌اند تغییرات در میزان بارندگی می‌تواند الگوهای تخصیص زیست‌توده را با تغییر در ترکیب گونه‌های گیاهی تحت تاثیر قرار دهند. در یک مطالعه هفت‌ساله در مراتع نیمه‌خشک چین، مشخص شد کاهش بارندگی در اوایل فصل رشد، باعث افزایش سهم زیست‌توده زیرزمینی می‌شود، درحالی‌که افزایش بارندگی در این دوره، عمدتاً موجب افزایش تولید زیست‌توده هوایی گونه‌های علفی می‌گردد. همچنین، کاهش بارندگی در اواخر فصل رشد نقش مهمی در تغییر توزیع ریشه‌های عمیق ایفا کرده و ترکیب گونه‌های گیاهی را بر اساس الگوی توزیع ریشه‌ای تغییر می‌دهد (Jin et al., 2024). این یافته‌ها نشان می‌دهند شناخت پاسخ‌های گیاهان به تغییرات بارندگی می‌تواند به بهبود مدل‌های اکوسیستمی و راهکارهای مدیریت مراتع در شرایط تغییرات اقلیمی کمک کند.

کاربردهای اکولوژیکی و مدیریت مراتع: نتایج این پژوهش می‌تواند در زمینه‌های مدیریت منابع طبیعی و اکولوژی مراتع به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک مفید باشد. درک نحوه پراکنش و رقابت ریشه‌ها می‌تواند به طراحی راهبردهای موثر برای حفظ و مدیریت پوشش گیاهی کمک کند. همچنین، این اطلاعات می‌تواند در برنامه‌ریزی‌های مربوط به حفاظت از مراتع و کاهش فرسایش خاک نیز موثر باشند. این یافته‌ها نشان می‌دهند راهبردهای ریشه‌ای هر گونه نه تنها در استفاده از منابع خاک، بلکه در تعامل با سایر گونه‌ها و تاثیر بر ویژگی‌های مکانیکی خاک نیز نقشی کلیدی دارند.

در نهایت مطالعه حاضر تاثیر رقابت ریشه‌ها و الگوهای توزیع فضایی آنها در دو گونه گیاهی گون و کلاه‌میرحسن در مراتع شانجان شبستر را بررسی کرد. نتایج نشان داد هر دو گونه ریشه‌های خود را عمدتاً در لایه‌های سطحی خاک تا عمق ۵۰ سانتی‌متری متمرکز می‌کنند، اما در لایه‌های عمیق‌تر، الگوی پراکنش ریشه‌ها در گونه گون متفاوت از کلاه‌میرحسن بود. گونه گون توانسته است ریشه‌های ضخیم‌تری در عمق‌های پایین‌تر خاک توسعه دهد، درحالی‌که کلاه‌میرحسن ریشه‌های کم‌قطر و بیشتری در این عمق‌ها ایجاد کرده است. این تفاوت‌ها احتمالاً به دلیل راهبردهای متفاوت ریشه‌ای این دو

گونه است که در آنها رقابت برای منابع خاکی به‌طور متفاوتی اتفاق می‌افتد. الگوی رقابت ریشه‌ها نیز در این مطالعه به‌طور برجسته‌ای نشان‌دهنده تفاوت‌ها بود. رقابت در گونه کلاه‌میرحسن شدیدتر از گون بود که ممکن است به علت تراکم بالاتر ریشه‌ها و ساختار ریشه‌ای متفاوت این گیاه باشد. در عمق‌های سطحی‌تر خاک، رقابت ریشه‌ها به‌طور تصادفی توزیع شده، اما در عمق‌های عمیق‌تر، رقابت باعث کاهش پراکنش فضایی و افزایش فاصله بین ریشه‌ها می‌شود. این تغییرات می‌تواند به‌خاطر تفاوت‌های جغرافیایی و نیازهای خاص هر گیاه به منابع خاکی باشد. این پژوهش تاکید می‌کند راهبردهای متفاوت رشد ریشه‌ای می‌تواند به‌طور موثری بر دسترسی گیاهان به منابع خاکی تاثیر گذارند. همچنین، استفاده از تابع همبستگی نشان‌دار به‌عنوان ابزاری جهت تحلیل الگوهای پراکنش فضایی ریشه‌ها در مطالعات اکولوژیک کاربرد دارد. نتایج این تحقیق می‌تواند در طراحی راهبردهای بهینه جهت مدیریت مراتع و حفاظت از پوشش گیاهی، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک که رقابت برای منابع خاکی بسیار حیاتی است، مفید باشد. علاوه بر این، این پژوهش می‌تواند به‌عنوان مبنای تحقیقاتی برای مطالعات آینده در زمینه رقابت ریشه‌ها و الگوهای توزیع فضایی در سایر گیاهان و اکوسیستم‌ها قرار گیرد.

تشکر و قدردانی

داده این مقاله برگرفته از پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد نویسنده اول مقاله حاضر به راهنمایی نویسنده مسئول این مقاله در رشته جنگلداری دانشگاه آزاد اسلامی واحد شبستر است.

منابع

- کریمی‌نژاد، ن.، عرفانی‌فرد، س.، فلاح‌شمسی، س. و صادقی، ح. (۱۳۹۶) تحلیل اثر پراکنش مکانی کپه‌ای درختان بنه (*Pistacia atlantica* Desf) بر ویژگی‌های زیست‌سنجی آنها با استفاده از تابع همبستگی نشان‌دار در جنگل تحقیقاتی بنه استان فارس. تحقیقات جنگل و صنوبر ایران، ۲۵(۲): ۲۶۴-۲۷۴. قابل دسترسی در: <https://doi.org/10.22092/ijfpr.2017.111761>
- Abdi, E., Majnounian, B., Rahimi, H. and Zobeiri, M. (2009) Distribution and tensile strength of Hornbeam (*Carpinus betulus*) roots growing on

- New Zealand soils. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 40(1): 49–63.
- Gning, F., Jourdan, C., Marone, D., Ngom, D. and Ræbild, A. (2023) Root distribution of *Adansonia digitata*, *Faidherbia albida* and *Borassus akeassii* along a climate gradient in Senegal. *Agroforestry Systems*, 97(4): 605-615. Retrived from <https://doi.org/10.1007/s10457-023-00813-7/>
- Jackson, R.B., Canadell, J., Ehleringer, J.R., Mooney, H.A., Sala, O.E. and Schulze, E.D. (1996) A global analysis of root distributions for terrestrial biomes. *Oecologia*, 108(3): 389-411. Retrived from <https://doi.org/10.1007/BF00333714/>
- Jin, H., Fan, C., Zhu, H., Zhang, Y., Xiao, R. and Yang, Z. (2024) Responses of plant biomass allocation to changed precipitation timing in a semi-arid steppe. *Plant and Soil*, 510(1): 395-406. Reterived from <https://doi.org/10.1007/s11104-024-06928-9/>
- Li, P.-F., Ma, B.-L., Wei, X.-F., Guo, S. and Ma, Y.-Q. (2024) Deeper root distribution and optimized root anatomy help improve dryland wheat yield and water use efficiency under low water conditions. *Plant and Soil*, 501(1): 437-454. Retrived from <https://doi.org/10.1007/s11104-024-06526-9/>
- Loo, E.P.I., Durán, P., Pang, T.Y., Westhoff, P., Deng, C., Durán, C., Lercher, M., Garrido-Oter, R. and Frommer, W.B. (2024) Sugar transporters spatially organize microbiota colonization along the longitudinal root axis of *Arabidopsis*. *Cell Host & Microbe*, 32(4): 543-556.e546. Retrived from <https://doi.org/10.1016/j.chom.2024.02.014/>
- Manoli, G., Bonetti, S., Domec, J.-C., Putti, M., Katul, G. and Marani, M. (2014) Tree root systems competing for soil moisture in a 3D soil–plant model. *Advances in Water Resources*, 66: 32-42. Retrived from <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2014.01.006/>
- Montazeri, F., Tamartash, R., Tatian, M.R. and Hojati, M. (2018) Potential of rangeland species *Astragalus globiflorus* and *Acantholimon hohenackeri* in heavy metals absorption, Case study: rangelands around the Firoozkough cement factory. *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 25(2): 278-288. Retrived from <https://doi.org/10.22092/ijrdr.2018.116840/>
- Muhandiram Karunarathne, C.L.S., Kikuta, M. and Nagaoka, T. (2024) Shoot and root responses to low phosphorus and their genotypic variability in selected cultivars of Japanese core collections of maize and soybean. *Soil Science and Plant Nutrition*, 70(2): 100-113. Retrived from <https://doi.org/10.1080/00380768.2023.2283487/>
- Mulia, R. and Dupraz, C. (2006) Unusual fine root distributions of two deciduous tree species in southern France: What consequences for modelling of tree root dynamics? *Plant and Soil*, 281(1): 71-85. Retrived from <https://doi.org/10.1007/s11104-005-3770-6/>
- Silva, J.S. and Rego, F.C. (2003) Root distribution of a Mediterranean shrubland in Portugal. *Plant and slopes of Caspian Forests, Iran. Journal of Forestry Research*, 20(2): 105-110. Retrived from <https://doi.org/10.1007/s11676-009-0019-x/>
- Abdi, E., Majnounian, B., Rahimi, H., Zobeiri, M., Mashayekhi, Z. and Yosefzadeh, H. (2010) A comparison of root distribution of three hardwood species grown on a hillside in the Caspian forest, Iran. *Journal of Forest Research*, 15(2): 99-107. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s10310-009-0164-2/>
- Akhavan, R., Parhizkar, P., Amanzadeh, B. and Mohammadnezhad Kiasari, S. (2017) Intra-specific competition of beech using Mark Correlation Function (MCF) in the Hyrcanian forests of Iran. *Forest and Wood Products*, 70(4): 637-648. Retrieved from <https://doi.org/10.22059/jfwp.2018.231550.841/>
- Akhavan, R. and Rostamikia, Y. (2020) Inter-specific competition of juniper trees in Kandiragh forest reserve using O-ring statistic and mark correlation function. *Forest and Wood Products*, 73(2): 189-200. Retrieved from <https://doi.org/10.22059/jfwp.2020.295907.1066/>
- Asadi, R., Hassan Pour, F., Mehrabani, M., Baghizadeh, A. and Karandish, F. (2018). Investigation the effect of deficit irrigation on root distribution and vegetative growth of *Rosmarinus Officinalis* L. *Water and Irrigation Management*, 8(2): 289-301. Retrieved from <https://doi.org/10.22059/jwim.2019.271640.650/>
- Bachofen, C., Tumber-Dávila, S.J., Mackay, D.S., McDowell, N.G., Carminati, A., Klein, T., Stocker, B.D., Mencuccini, M. and Grossiord, C. (2024) Tree water uptake patterns across the globe. *New Phytologist*, 242(5): 1891-1910. Retrived from <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/nph.19762/>
- Carvalho, J.I., Carayugan, M.B., Tran, L.T., Hernandez, J.O., Youn, W.B., An, J.Y. and Park, B.B. (2024) Variation in Root Biomass and Distribution Based on the Topography, Soil Properties, and Tree Influence Index: The Case of Mt. Duryun in Republic of Korea. *Plants*, 13(10): 134- 141.
- Casper, B.B. and Jackson, R.B. (1997) Plant competition underground. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 28: 545–570. Retrieved from <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.28.1.545/>
- Davoudi, M.H. and Fatemi Aqda, M. (2009) Effect of diameter and density of willow roots on shear resistance of soils. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 18(71): 143-148. Retrieved from <https://doi.org/10.22071/gsj.2010.57003/>
- Fan, J., McConkey, B., Wang, H. and Janzen, H. (2016) Root distribution by depth for temperate agricultural crops. *Field Crops Research*, 189: 68-74. Retrived from <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.02.013/>
- Grant, J., Bach, L.H. and Green, S.R. (2010) Root distribution and water uptake in young poplar trees in

- 502(1): 7-30. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s11104-023-06464-y/>
- Zhu, W., Zhao, D., Di, N., Li, D., Zhou, O., Sun, Y., Jia, L., Ding, C. and Xi, B. (2024) Matching root water uptake patterns to fine root and soil water distributions. *Plant and Soil*, 495(1): 499-516. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s11104-023-06349-0/>
- Soil, 255(2): 529-540. Retrieved from <http://www.jstor.org/stable/24123968/>
- Zhang, S., Chen, Y., Zhou, X. and Zhu, B. (2024a) Spatial patterns and drivers of ecosystem multifunctionality in China: Arid vs. humid regions. *Science of The Total Environment*, 920: 170868. Retrived from <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170868/>
- Zhang, W.-P., Surigaogee, S., Yang, H., Yu, R.-P., Wu, J.-P., Xing, Y., Chen, Y. and Li, L. (2024b) Diversified cropping systems with complementary root growth strategies improve crop adaptation to and remediation of hostile soils. *Plant and Soil*,

Spatial Root Distribution Patterns and Competition in *Acantholimon* and *Astragalus* Species in the Rangelands of Shanjan, Shabestar Using Python Software

Mysam Alizadeh¹ and Ghassem Habibi Bibalani^{2*}

- 1) Graduate, Department of Agriculture, Shabestar Branch, Islamic Azad University, Shabestar, Iran.
- 2) Associate Professor, Department of Agriculture, Shabestar Branch, Islamic Azad University, Shabestar, Iran. *Corresponding Author's Email Address: habibibibalani@iau.ac.ir

Date of Submission: 2024/12/18

Date of Acceptance: 2025/05/15

Abstract

Root competition plays a significant role as a key factor in determining plant distribution patterns and their adaptation in rangeland ecosystems. This research aimed to investigate the effect of root competition and the spatial distribution pattern of roots of two species, *Astragalus* sp. and *Acantholimon* sp., in the Shanjan Shabestar rangelands. The main objective of this study was to analyze the root distribution in different soil layers and the effect of soil physical properties on their competition. Sampling was conducted at five different depths (0-10, 10-20, 20-30, 30-40, and 40-50 cm), and root characteristics, including the number and diameter of roots, were measured. Root competition was analyzed using the Marked Correlation Function (MCF) and the extraction of the competition index. Soil physical properties, including texture, moisture, and organic matter, were also measured. The results showed that the number of roots in both species decreased with increasing depth, especially in the 30-50 cm depths, where a decrease of more than 88% in *Astragalus* sp. and 81.67% in *Acantholimon* sp. was observed. In *Astragalus* sp., the highest root density was recorded in the surface layer (0-10 cm) with an average of 50 roots per unit area, while in *Acantholimon* sp., this value was 60. The root distribution in *Astragalus* sp. showed a uniform decreasing trend, but in *Acantholimon* sp., a sharper decrease was observed in the lower depths. The root diameter in *Astragalus* sp. increased with depth and reached its maximum value (1.21 mm) at the 40-50 cm depth, while in *Acantholimon* sp., the highest average root diameter was observed at the 0-10 cm depth (0.83 mm) and then decreased. Competition analysis showed that *Acantholimon* sp. had stronger root competition than *Astragalus* sp., especially in the surface layers where the competition index was higher. At lower depths, due to the decrease in root density and greater access to resources, the intensity of competition decreased. Furthermore, the results showed that soil texture and moisture had a significant effect on root distribution and competition intensity. In soils with heavier texture and higher moisture, root density and competition intensity increased. These findings suggest that different species adopt different root growth strategies in response to competition and resource availability in soil layers. The results of this research can be used in rangeland management, improving vegetation restoration strategies, and increasing the productivity of rangeland ecosystems, especially in arid and semi-arid regions.

Keywords: *Acantholimon* , *Astragalus*, Python software, Root competition, Spatial root distribution.