University of Tehran

Journal of Forest and Wood Products

Online ISSN: 2383-0530

Home Page: https://jfwp.ut.ac.ir

The role of fog precipitation in nutrient input to Oriental Beech (*Fagus orientalis* L.) stands at high elevations of the Hyrcanian forests

Kimiya Mostafanezhad Nesheli[1] | Pedram Attarod[2*] | Vahid Etemad[3] | Atefeh Dezhban[4] | Mohammad Sadegh Kavianpour[5] | Somayeh Mirzaie[6] | Ehsan Abdi[7]

1. Department of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-Mail: mostafanezhad.78@ut.ac.ir
2. Corresponding author, Department of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: attarod@ut.ac.ir
3. Department of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-Mail: vetemad@ut.ac.ir
4. Department of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-Mail: adejban@ut.ac.ir
5. Department of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-Mail: m.sa.kavianpour78@ut.ac.ir
6. Department of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-Mail: mirzaei.5261@ut.ac.ir
7. Department of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-Mail: abdie@ut.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Research Article

Article History:
Received: 05 July 2025
Revised: 25 August 2026
Accepted: 13 September 2026
Published online: 20 November 2026

Keywords:
Canopy leaching,
Forest ecohydrology,
Fog precipitation chemistry,
Nutrient cycling.

ABSTRACT

Introduction: In the high-elevation areas of the Hyrcanian forests, frequent fog events and subsequent fog precipitation occur during the growing season, due to the high humidity of the Caspian Sea and complex topography. In addition to supplying water, fog precipitation plays an important role in ion deposition and the nutrient cycling of the forest. However, changes in the chemical composition of fog precipitation after passing through the oriental beech canopy (*Fagus orientalis* Lipsky) and its contribution to nutrient inputs to the forest floor have not yet been studied. Therefore, this study aimed to measure the acidity (pH), electrical conductivity (EC), and concentrations of potassium (K^+), sodium (Na^+), calcium (Ca^{++}), and magnesium (Mg^{++}) in fog precipitation of pure beech stands located at the highlands of the Hyrcanian forests and to compare its nutrient contents with those of open-field rainfall.

Method: This study was conducted in a pure beech stand in the Hyrcanian forests during the growing season, coinciding with four rainfall events. For chemical analysis, rainwater of four events accompanied with fog were sampled. To achieve this, 50 fog precipitation collectors were installed under the canopy. In addition, 30 open-area rainfall collectors and six stemflow collectors were installed in an open area, and on the trunk of selected trees, respectively. In total, for each rainfall event, five fog precipitation and three open-field rainfall samples were analyzed for pH, EC, K^+, Na^+, Ca^{++}, and Mg^{++}. After confirming normality with the Shapiro–Wilk test, the data were compared using independent t-tests and Mann–Whitney tests at the 5% significance level.

Results: The mean (±standard deviation: SD) pH of fog precipitation (6.5±0.6) beneath the beech canopy did not differ significantly from that of open-field rainfall (6.0±0.3) across the studied events (P>0.05). However, the EC of fog precipitation in the second (112.4 µS cm^{-1}) and fourth (79.6) events (P<0.05) was significantly higher than those of open-field rainfall (40.8, and 21.8 µS cm^{-1}, respectively). K^+ concentrations in fog precipitation were significantly greater than those in open-field rainfall across all events (P<0.05), with the highest value recorded in the third event at 21.5 ± 1.6 ppm, while the maximum concentration in open-field rainfall was 4.0 ± 0.1 ppm. Na^+ concentration of fog precipitation also exhibited significant differences from that of open-field rainfall in all four events (P<0.05). The third event showed the maximum concentration of Na^+ for both fog precipitation (3.4 ppm ± 0.7) and the open-field rainfall (5.8 ppm ± 0.1). Nevertheless, the Na^+ concentration of fog precipitation in the second (1.35 ppm) and fourth (0.55 ppm) events was higher than that of open-field rainfall, which differed from the concentration observed in the first and third events. Ca^{++} and Mg^{++} showed significant differences in all events (P<0.05). The maximum Ca^{++} concentration was observed in the third event for both fog precipitation (14.5 ppm ± 2.7) and open-field rainfall (24.2 ppm ± 0.5). Likewise, the maximum Mg^{++} concentration was measured for the third event; 3.1 ppm ± 0.5 for fog precipitation and 5.7 ppm ± 0.1 ppm for open-field rainfall.

Conclusion: This study indicated that fog precipitation is a significant source of nutrient input into the ecosystem of upper-montane Hyrcanian beech forests. While fog precipitation did not significantly affect pH, it altered EC and nutrient concentrations. K^+ showed a significant increase in fog precipitation, indicating intense leaching, whereas Ca^{++}, Mg^{++}, and Na^+ exhibited different patterns. These findings could be instrumental in improving the precision of nutrient input estimations, monitoring the health of beech stands, and predicting the consequences of climate change on water and nutrient cycles in forest ecosystems.

Cite this article: Mostafanezhad Nesheli, K., Attarod, P., Etemad, V., Dezhban, A., Kavianpour, M.S., Mirzaie, S., Abdi, E. (2026). The role of fog precipitation in nutrient input to Oriental Beech (*Fagus orientalis* L.) stands at high elevations of the Hyrcanian forests. *Journal of Forest and Wood Products*, 79 (3), 253-267. DOI: http//doi.org/10.22059/jfwp.2026.417964.1402

© The Author(s) **Publisher:** University of Tehran Press.
DOI: http//doi.org/10.22059/jfwp.2026.417964.1402

دانشگاه تهران

نشریهٔ جنگل و فرآورده‌های چوب

سایت نشریه: https://jfwp.ut.ac.ir

شاپا الکترونیکی: ۰۵۳۰-۲۳۸۳

نقش مه‌بارش در ورود عناصر غذایی به توده‌های راش شرقی (*Fagus orientalis* L.) ارتفاعات بالابند جنگل‌های هیرکانی

کیمیا مصطفی‌نژاد نشلی[۱] | پدرام عطارد[۲*] | وحید اعتماد[۳] | عاطفه دژبان[۴] | محمد صادق کاویانپور[۵] | سمیه میرزایی[۶] | احسان عبدی[۷]

۱. گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکدهٔ منابع طبیعی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: mostafanezhad.78@ut.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکدهٔ منابع طبیعی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه:attarod@ut.ac.ir

۳. گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکدهٔ منابع طبیعی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه:vetemad@ut.ac.ir

۴. گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکدهٔ منابع طبیعی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه:adejban@ut.ac.ir

۵. گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکدهٔ منابع طبیعی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه:m.sa.kavianpour78@ut.ac.ir

۶. گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکدهٔ منابع طبیعی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه:mirzaei.5261@ut.ac.ir

۷. گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکدهٔ منابع طبیعی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه:abdie@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۱۴
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۶/۰۳
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۲۲
تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۸/۲۹

کلیدواژه:
آبشویی تاج‌پوشش، اکوهیدرولوژی جنگل، چرخهٔ عناصر غذایی، شیمی مه‌بارش.

چکیده

مقدمه: در ارتفاعات بالابند جنگل‌های هیرکانی، به‌دلیل رطوبت بالای دریای خزر و توپوگرافی پیچیده، در فصل رویش رخدادهای مه و در نتیجه مه‌بارش فراوان هستند. مه‌بارش افزون بر تأمین آب، در رسوب یون‌ها و چرخهٔ عناصر غذایی جنگل نیز نقش مهمی دارد. با این حال، تغییرات ترکیب شیمیایی مه‌بارش پس از عبور از تاج‌پوشش درختان راش شرقی (*Fagus orientalis* Lipsky) و سهم آن در ورود عناصر به کف جنگل، تاکنون بررسی نشده است. بنابراین، هدف این پژوهش، اندازه‌گیری اسیدیته (pH)، هدایت الکتریکی (EC) و غلظت عناصر غذایی پتاسیم، سدیم، کلسیم و منیزیم مه‌بارش و مقایسهٔ آن با عناصر غذایی باران فضای باز در توده‌های خالص راش ارتفاعات بالابند جنگل‌های هیرکانی بود.

روش پژوهش: این مطالعه در یک تودهٔ خالص راش در جنگل‌های هیرکانی، طی فصل رویش و همزمان با چهار رخداد بارش انجام شد. برای بررسی ویژگی‌های شیمیایی مه‌بارش، آب حاصل از چهار رخداد بارندگی همراه با مه که با ورود آب ناشی از مه‌بارش همراه بودند، نمونه‌برداری شد. بدین‌منظور، ۵۰ جمع‌آوری‌کنندهٔ مه‌بارش در زیر تاج‌پوشش، ۳۰ جمع‌آوری‌کنندهٔ باران در فضای باز و شش جمع‌آوری‌کنندهٔ ساقاب نصب شد. در مجموع، از هر رخداد بارش، پنج نمونهٔ مه‌بارش و سه نمونهٔ باران از فضای باز از نظر pH، هدایت الکتریکی، پتاسیم، سدیم، کلسیم و منیزیم بررسی و مقایسه شدند. داده‌ها پس از تأیید نرمال بودن با آزمون شاپیرو–ویلک، با آزمون‌های t مستقل و من–ویتنی در سطح معنی‌داری پنج درصد مقایسه شدند.

یافته‌ها: میانگین (± انحراف معیار) pH مه‌بارش زیر تاج‌پوشش تودهٔ راش شرقی (۶/۰±۶/۵) در چهار رخداد بررسی‌شده، تفاوت معنی‌داری با باران فضای باز (۰/۳±۶/۰) نشان نداد ($P>0/05$). با این‌حال، هدایت الکتریکی مه‌بارش در رخدادهای دوم (۱۱۲/۴ میکروزیمنس بر سانتی‌متر) و چهارم (۷۹/۶) نسبت به باران فضای باز (به‌ترتیب: ۴۰/۸ و ۲۱/۸ میکروزیمنس بر سانتی‌متر) افزایش معنی‌دار داشت ($P<0/05$). در میان عناصر غذایی اندازه‌گیری‌شده، پتاسیم در تمامی رخدادها، در مه‌بارش افزایش معنی‌داری نسبت به باران فضای باز نشان داد ($P<0/05$) و بیشترین مقدار (± انحراف معیار) آن در رخداد سوم به مقدار ۶/۱± ۲۱/۵ قسمت در میلیون ثبت شد، در حالی‌که حداکثر غلظت آن در باران فضای باز، ۰/۱ ± ۴/۰ قسمت در میلیون (رخداد اول) بود. سدیم نیز در هر چهار رخداد با باران فضای باز اختلاف معنی‌دار داشت ($P<0/05$)؛ بیشترین غلظت آن در رخداد سوم در مه‌بارش، ۰/۷± ۳/۴ و در باران فضای باز، ۰/۱ ± ۵/۸ قسمت در میلیون بود. در رخدادهای دوم (۱/۳۵ قسمت در میلیون) و چهارم (۰/۵۵) برخلاف رخدادهای اول و سوم، افزایش معنی‌دار سدیم در مه‌بارش مشاهده شد. کلسیم و منیزیم نیز در همهٔ رخدادها تفاوت معنی‌دار نشان دادند ($P<0/05$)؛ بیشترین غلظت کلسیم در رخداد سوم در مه‌بارش ۲/۷±۱۴/۵ و در باران فضای باز ۰/۵±۲۴/۲ قسمت در میلیون و بیشترین مقدار منیزیم نیز در همان رخداد، ۰/۵±۳/۱ قسمت در میلیون در مه‌بارش و (±۰/۱) ۵/۷ قسمت در میلیون در باران فضای باز ثبت شد.

نتیجه‌گیری: نتایج پژوهش نشان داد که مه‌بارش یکی از منابع مهم ورود عناصر غذایی به بوم‌سازگان جنگل‌های راشِ بالابند هیرکانی است. مه‌بارش تأثیر قابل‌توجهی بر pH نداشت، اما موجب تغییر در هدایت الکتریکی و غلظت عناصر شد. پتاسیم مه‌بارش افزایش معنی‌داری در مقایسه با پتاسیم باران نشان داد که بیانگر آبشویی شدید تاج‌پوشش است، در حالی‌که کلسیم، منیزیم و سدیم الگوهای متفاوتی داشتند. این یافته‌ها می‌تواند در برآورد دقیق‌تر ورودی عناصر غذایی، پایش سلامت توده‌های راش و پیش‌بینی پیامدهای تغییرات اقلیمی بر چرخهٔ آب و عناصر در جنگل‌ها نقش مهمی ایفا کند.

استناد: مصطفی‌نژاد نشلی؛ کیمیا، عطارد؛ پدرام، اعتماد؛ وحید، دژبان؛ عاطفه، کاویانپور؛ محمد صادق، میرزایی؛ سمیه، عبدی؛ احسان (۱۴۰۵). نقش مه‌بارش در ورود عناصر غذایی به توده‌های راش شرقی (*Fagus orientalis* L.) ارتفاعات بالابند جنگل‌های هیرکانی. *نشریهٔ جنگل و فرآورده‌های چوب*، ۷۹ (۳)، ۲۶۷–۲۵۳. DOI: https://10.22059/jfwp.2026.417964.1402

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.
https://doi.org/10.22059/jfwp.2026.417964.1402

۱. مقدمه

جنگل‌های هیرکانی از کهن‌ترین رویشگاه‌های پهن‌برگ خزان‌کنندهٔ معتدل جهان هستند که در نواری به‌طول حدود ۸۰۰ کیلومتر از آستارا در استان گیلان تا گلیداغ در مرز استان‌های گلستان و خراسان شمالی در نیمرخ شمالی البرز گسترده شده‌اند. این جنگل‌ها با قدمتی بین ۲۵ تا ۴۰ میلیون سال، یکی از مهم‌ترین میراث‌های طبیعی ایران و جهان به‌شمار می‌آیند [۱]. در این ناحیهٔ رویشی، راش شرقی (*Fagus orientalis* Lipsky) به‌عنوان گونه‌ای سایه‌پسند و غالب، در ارتفاعات ۷۰۰ تا ۲۲۰۰ متر پراکنش دارد [۲]. این نوار ارتفاعی به‌دلیل رطوبت زیاد دریای خزر، توپوگرافی پیچیده و وقوع مکرر مه، محل اصلی چگالش توده‌های هوای مرطوب دریای خزر است [۱، ۲]. در چنین شرایطی، مه، نقش مهمی در تأمین رطوبت پوشش گیاهی ایفا می‌کند و در فصل رویش می‌تواند منبع قابل‌توجهی از آب برای بوم‌سازگان‌های جنگلی باشد [۲، ۳]. از این‌رو، مه، نه‌تنها یکی از مؤلفه‌های مهم اقلیم محلی است، بلکه در بسیاری از فرآیندهای اکوهیدرولوژیک نیز نقش دارد [۴].

رخدادهای مکرر مه در ارتفاعات بالابند جنگل‌های هیرکانی، به‌ویژه در رویشگاه‌های راش، سبب شده است که مه‌بارش به‌عنوان یکی از ورودی‌های مهم آب و مواد محلول مورد توجه قرار گیرد [۲]. در واقع، مه‌بارش زمانی رخ می‌دهد که مه با سطوح تاج‌پوشش تماس یافته، متراکم شده و قطرات ریز مه پس از تجمع با یکدیگر، به‌صورت قطرات بزرگ‌تر به کف جنگل می‌رسند یا در فرآیندهای تاج‌بارش و ساقاب مشارکت می‌کنند [۲]. در چنین شرایطی، ممکن است پدیدهٔ باران‌ربایی منفی[1]رخ دهد، به‌طوری‌که مجموع تاج‌بارش (باران رسیده به کف جنگل پس از عبور از تاج درختان) و ساقاب (باران رسیده به کف جنگل با جاری شدن از تنه درختان) از مقدار بارش اندازه‌گیری‌شده در فضای باز بیشتر شود [۵]. ترکیب شیمیایی مه‌بارش تحت‌تأثیر عواملی چون منشأ توده‌های هوا، شرایط جوی، ارتفاع از سطح دریا، فاصله از منابع دریایی یا انسانی، توپوگرافی، نوع پوشش گیاهی و میزان تماس قطرات با تاج درختان است. پس از تماس بارش و مه با تاج گیاهان، فرآیندهایی مانند شستشوی رسوبات خشک، آبشویی عناصر، تبادل یونی و جذب سطحی رخ می‌دهد. در نتیجه، ترکیب شیمیایی تاج‌بارش و مه‌بارش می‌تواند با ترکیب اولیهٔ بارش یا مه تفاوت قابل‌توجهی داشته باشد [۴، ۶]. بنابراین، مه و مه‌بارش به‌عنوان یکی از منابع کلیدی تأمین عناصر غذایی در بوم‌سازگان‌های کوهستانی، نقشی تعیین‌کننده در پویایی چرخهٔ عناصر و سلامت اکولوژیک این جنگل‌ها ایفا می‌کنند [۴، ۷].

برخی مطالعات نشان داده‌اند که مه و مه‌بارش حاوی غلظت‌های قابل‌توجهی از یون‌ها و عناصر محلول نظیر پتاسیم، سدیم، کلسیم و منیزیم هستند [۸]. پتاسیم به‌عنوان یکی از عناصر کلیدی در فرآیندهای متابولیک گیاه، در فصل رشد بیشتر شسته می‌شود و معمولاً غلظت بالاتری در مه‌بارش نسبت به باران نشان می‌دهد [۸، ۹]. سدیم نیز در تنظیم برخی فرآیندهای اسمزی نقش دارد [۱۰]. کلسیم یکی از عناصر ضروری برای گیاه است که علاوه بر نقش در اصلاح خاک‌های اسیدی و بهبود ساختمان خاک، در رشد و توسعهٔ ریشه، تنظیم تنفس و انتقال ازت در اندام‌های گیاه نیز نقش مهمی دارد [۱۰]. منیزیم نیز به‌دلیل نقش مرکزی در ساختار مولکول کلروفیل، در فرآیند فتوسنتز اهمیت دارد [۱۱]. در پژوهش Abe و همکاران (۲۰۲۲) در کوه ساراکورای ژاپن، در تودهٔ جنگلی پهن‌برگ خزان‌کننده در ارتفاع ۵۵۰ متر که تقریباً مشابه با رویشگاه کوهستانی جنگل‌های هیرکانی است، غلظت کلسیم و منیزیم در مه‌بارش به‌ترتیب، ۱/۷ و ۱/۵ برابر باران ثبت شد که علت آن، همجواری توده با ساحل دریا و حمل ذرات دریایی و خاک از طریق باد گزارش شد [۱۲]. همچنین، در پژوهش Wang و Ge (۲۰۲۶) در چین، در جنگلی سوزنی‌برگ واقع در ارتفاعات کوه سجیلا که دارای رطوبت زیاد و مه‌های مکرر است، کلسیم به‌عنوان یکی از عناصر غالب در باران و مه‌بارش معرفی شد که این امر به ویژگی‌های خاک منطقه و نتایج مطالعات متعدد نسبت داده شده است [۱۳]. در این پژوهش، سهم مه‌بارش در رسوب کاتیون‌ها در مقایسه با باران برای کلسیم، پتاسیم، منیزیم و سدیم به‌ترتیب ۴/۱، ۲/۴، ۴/۸ و ۱/۵ درصد بود. این یافته‌ها نشان می‌دهد که مه‌بارش در تأمین برخی کاتیون‌ها سهم دارد و این سهم تحت تأثیر عواملی همچون ارتفاع، نوع پوشش گیاهی و منشأ توده‌های هوایی قرار می‌گیرد [۴]. به‌طور کلی، غلظت بیشتر یون‌ها در مه‌بارش، بیانگر نقش مهم آن به‌عنوان یکی از منابع مهم ورود عناصر غذایی به بوم‌سازگان‌های جنگلی است [۹].

پژوهش‌های انجام‌شده در جنگل‌های هیرکانی به‌طور عمده بر کمی‌سازی مه‌بارش متمرکز بوده‌اند و جنبه‌های کیفی این پدیده

[1]Negative interception

کمتر مورد توجه قرار گرفته است. Dezhban و همکاران (۲۰۱۹) در مطالعه‌ای در جنگل خیرود نوشهر، مستقر در ارتفاع ۱۵۰۰ متر از سطح دریا، با مشاهده پدیدهٔ باران‌ربایی منفی، مجموع مه‌بارش را ۲۲/۶ میلی‌متر در ۱۴ رخداد گزارش کردند [۵]. در پژوهشی دیگر، Kavianpour و همکاران (۲۰۲۵) در تودهٔ راش شرقی جنگل پس‌پرس شهرستان نور استان مازندران و در ارتفاع حدود ۲۰۰۰ متر از سطح دریا، پتانسیل جذب مه توسط تاج‌پوشش جنگل‌های ارتفاعات بالابند، حدود ۱۰۰ مترمکعب در هکتار در هر فصل رویش گزارش شد. برآوردها نشان داد که هر هکتار از این جنگل‌ها، تنها در فصل رویش، می‌تواند ۴۰۰ مترمکعب آب اضافی را از طریق مه‌بارش به بیلان آبی جنگل بیفزایند [۲]. این نتایج بر نقش مه‌بارش به‌عنوان یکی از ورودی‌های مهم آب در توده‌های راش تأکید دارند. با این حال، دربارهٔ ترکیب شیمیایی مه‌بارش و سهم آن در تأمین عناصر غذایی این توده‌ها در جنگل‌های هیرکانی تاکنون پژوهشی انجام نشده است.

با توجه به محدودیت مطالعات مرتبط با چرخهٔ عناصر غذایی در راشستان‌های هیرکانی، بررسی ویژگی‌های شیمیایی مه‌بارش و ارزیابی نقش آن در ورودی عناصر غذایی، می‌تواند در درک فرآیندهای تغذیه‌ای این بوم‌سازگان‌ها بسیار حائز اهمیت باشد [۱۰، ۱۴]. با توجه به مطالب ذکر شده، هدف این پژوهش، اندازه‌گیری اسیدیته، هدایت الکتریکی و غلظت عناصر غذایی شامل پتاسیم، سدیم، کلسیم و منیزیم در مه‌بارش و مقایسهٔ ویژگی‌های شیمیایی آن با باران (فضای باز) در توده‌های خالص راش ارتفاعات بالابند جنگل‌های هیرکانی بود تا اهمیت مه‌بارش در ورود عناصر غذایی به این توده‌ها ارزیابی شود.

۲. روش‌شناسی پژوهش

۲-۱. منطقهٔ مورد مطالعه

منطقهٔ مورد مطالعه در جنگل راش روستای ییلاقی پس‌پرس (شکل ۱)، در فاصلهٔ ۴۳ کیلومتری جنوب شهرستان نور واقع شده است. به‌منظور اندازه‌گیری مه‌بارش، یک توده خالص راش با مساحت ۴۵۰۰ مترمربع انتخاب شد. این منطقه در موقعیت جغرافیایی "۳۶°۲۵'۰۵ شمالی و "۵۱°۴۸'۳۱ شرقی و در ارتفاع ۲۰۰۰ متری از سطح دریا قرار دارد (شکل ۱). تودهٔ مورد مطالعه دانه و شاخه‌زاد تک‌آشکوبه بوده و ترکیب درختی آن را درختان دانه‌زاد راش به‌همراه تک‌پایه‌هایی از ممرز و گلابی وحشی تشکیل می‌دهند که به‌طور عمده شاخه‌زاد هستند. تنه و شاخه‌های درختان راش فاقد گیاهان بالارونده بوده و در بخش‌هایی از تنه، پوشش خزه و گلسنگ (۳۵ درصد) مشاهده شد. این منطقه به‌دلیل برخورداری از توده‌های خالص و طبیعی راش، وقوع مه‌های مکرر (به‌ویژه در دوره رویش) و همچنین دسترسی مناسب انتخاب شد. براساس یافته‌های Kavianpour و همکاران (۲۰۲۵)، تعداد روزهای مه‌آلود در این منطقه طی فصل رویش، ۷۴ روز (معادل ۴۴/۳ درصد از طول فصل رویش) گزارش شده است. میانگین شیب تودهٔ مورد مطالعه ۳۰ تا ۳۵ درصد با جهت جغرافیایی شمال تا شمال شرقی (شکل ۲) ثبت شد. موقعیت دقیق و ارتفاع منطقه با استفاده از دستگاه GPS Garmin 64sx با دقت سه متر تعیین شد.

آماربرداری از توده به‌صورت صددرصد انجام شد که طی آن قطر برابر سینه (DBH[1]) درختان با نوار قطرسنج (با دقت یک سانتی‌متر) و ارتفاع کل و ارتفاع تاج با استفاده از دستگاه شیب‌سنج سونتو (با دقت یک درصد) اندازه‌گیری شد؛ در نهایت، مساحت تصویر تاج (CPA[2]) از طریق اندازه‌گیری قطر تاج در دو جهت اصلی و با بهره‌گیری از فرمول مساحت دایره محاسبه شد [۲]. برای برآورد شاخص سطح برگ (LAI[3]) در دورهٔ رویش، از عکس‌برداری دیجیتال نیم‌کره‌ای با دوربین Canon EOS 6D مجهز به لنز فیش‌آی ۱۸۰ درجه استفاده شد. دوربین به‌صورت عمودی در بالای جمع‌آوری‌کننده‌های تاج‌بارش نصب شد [۳]. عکس‌برداری در شرایط آسمان یکنواخت یا در زمان‌های نزدیک به طلوع و غروب خورشید و در ارتفاع ۱/۳ متری از سطح زمین انجام شد. در نهایت، شاخص سطح برگ با استفاده از نرم‌افزار (GLA[4]) نسخهٔ ۲/۰، محاسبه شد [۳].

[1]Diameter at Breast Height
[2]Crown Projection Area
[3]Leaf Area Index
[4]Gap Light Analyzer



شکل ۱. چشم‌اندازی از تودهٔ مه در روستای پس‌پرس (بالا)؛ تودهٔ راش شرقی مورد مطالعه در دو شرایط بارندگی همراه با مه و بدون مه (پایین) [تصاویر از محمدصادق کاویانپور، ۱۴۰۴].

۲-۲. روش تحقیق

این مطالعه به‌مدت سه ماه در تابستان ۱۴۰۴ انجام شد. برای هر رخداد بارندگی، مؤلفه‌های توزیع بارش شامل باران در فضای باز (OFR[1])، تاج‌بارش و ساقاب اندازه‌گیری شد. باران در فضای باز و زیر تاج تودهٔ راش به‌ترتیب با استفاده از ۳۰ و ۵۰ جمع‌آوری‌کننده اندازه‌گیری شدند. تمام جمع‌آوری‌کننده‌ها دارای قطر دهانهٔ ۹ سانتی‌متر و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر بودند و از نظر ابعاد و شکل یکسان انتخاب شدند. جمع‌آوری‌کننده‌های زیر تاج در عمق حدود ۱۰ سانتی‌متری خاک نصب شدند (شکل ۲)، در حالی‌که جمع‌آوری‌کننده‌های فضای باز برای جلوگیری از پاشش قطرات در ارتفاع دو متری از سطح زمین قرار گرفتند (شکل ۲). برای اندازه‌گیری دقیق حجم باران و تاج‌بارش از استوانهٔ مدرج با دقت یک میلی‌متر استفاده شد. عمق باران و تاج بارش در جمع‌آوری‌کننده‌ها از رابطهٔ ۱ محاسبه شد [۲].

$$D_{GR\ or\ TF} = \frac{V}{A}$$ رابطهٔ ۱)

در این رابطه: $D_{GR\ or\ TF}$ عمق باران یا تاج‌بارش برحسب سانتی‌متر؛ V حجم باران یا تاج‌بارش جمع‌آوری‌شده توسط جمع‌آوری‌کننده برحسب سانتی‌متر مکعب و A سطح جمع‌آوری‌کننده برحسب سانتی‌متر مربع است. در مجموع، میانگین عمق حاصل از ۳۰ جمع‌آوری‌کننده باران به‌عنوان میانگین باران در فضای باز و میانگین عمق ۵۰ جمع‌آوری‌کننده برای تاج‌بارش به‌عنوان میانگین تاج‌بارش در آن رخداد بارندگی درنظر گرفته شد (شکل ۲).

ساقاب بر روی شش درخت منتخب از سه طبقهٔ قطری ۳۰–۱۰، ۵۰–۳۰ و بیشتر از ۵۰ سانتی‌متر (دو درخت از هر طبقه) اندازه‌گیری شد [۲]. درختان مورد مطالعه به‌صورت تصادفی از میان درختان سالم، منفرد و دارای تاج کامل انتخاب شدند تا اثرات ساختار تاج به‌درستی منعکس شود [۵]. انتخاب طبقات قطری نیز براساس نمودار توزیع طبقات قطری در توده انجام گرفت تا تمام مراحل توسعهٔ ساختاری (جوان، میانسال و کهنسال) به‌طور متوازن در نمونه‌برداری پوشش داده شود [۲]. برای جمع‌آوری ساقاب، لوله‌های PVC با قطر ۵ سانتی‌متر به‌صورت مارپیچی در ارتفاع برابر سینه نصب و با درزگیر سیلیکونی آب‌بندی شدند تا ساقاب به

[1] Open Field Rainfall

مخازن ۲۰ لیتری هدایت شود (شکل ۲). حجم ساقاب جمع‌آوری شده از هر درخت، ابتدا در بشرهای پلاستیکی دو لیتری جمع‌آوری و سپس با استوانه‌های مدرج با دقت پنج میلی‌متر اندازه‌گیری و عمق ساقاب از رابطهٔ ۲ محاسبه شد [۵].

$$D_{SF} = \frac{V}{CPA}$$ رابطهٔ ۲)

در این رابطه: D_{SF} عمق ساقاب برحسب سانتی‌متر؛ V حجم ساقاب جمع‌آوری شده بر حسب سانتی‌متر مکعب و CPA سطح تاج‌پوشش درخت منتخب ساقاب است. میانگین داده‌های این شش درخت، به‌عنوان مقدار ساقاب توده در نظر گرفته شد [۵]. برای اطمینان از خشک شدن تاج درختان، حداقل فاصلهٔ زمانی پنج ساعت بین دو رخداد بارندگی درنظر گرفته شد. همچنین، بارندگی‌های متوالی که در فاصلهٔ زمانی کوتاه رخ می‌دادند به‌عنوان یک رخداد واحد محسوب شدند. اندازه‌گیری‌ها بلافاصله پس از پایان بارندگی انجام شد و در صورت وقوع بارش در طول شب، اندازه‌گیری‌ها در صبح روز بعد صورت گرفت [۲].

تشخیص مه‌بارش براساس روش موازنهٔ باران‌ربایی انجام شد. براساس مطالعه پیشین Kavianpour و همکاران (۲۰۲۵)، مبنی بر ناچیز بودن ورودی آب حاصل از مه خالص در منطقهٔ مورد مطالعه، در این پژوهش، رخدادهای مه خالص از محاسبات حذف شدند و رخدادهای بارندگی به دو گروه بارندگی خالص (بدون مه) و بارندگی همراه با مه تقسیم شدند [۲]. در این پژوهش، مقدار باران‌ربایی (I[1]) از رابطهٔ ۳ محاسبه شد [۲].

$$I = OFR - (TF + SF)$$ رابطه ۳)

در این رابطه: OFR[2] بیانگر باران اندازه‌گیری‌شده در فضای باز؛ TF[3] تاج‌بارش؛ SF[4] ساقاب و I مقدار باران‌ربایی است. در حالت معمول مقدار باران‌ربایی مثبت است، اما زمانی‌که مجموع تاج‌بارش و ساقاب از باران فضای باز بیشتر شود، مقدار باران‌ربایی منفی می‌شود که نشان‌دهندهٔ ورود آب اضافی ناشی از مه‌بارش به زیر تاج‌پوشش جنگل است. در این شرایط، مقدار مه‌بارش برابر با قدرمطلق مقدار باران‌ربایی درنظر گرفته شد [۲].



شکل ۲. موقعیت جمع‌آوری‌کننده‌های فضای باز (سمت چپ، بالا)، تاج‌بارش (سمت چپ، پایین) و ساقاب (سمت راست) در تودهٔ راش شرقی مورد مطالعه [تصاویر از محمدصادق کاویانپور، ۱۴۰۴].

[1] Interception
[2] Open Field Rainfall
[3] Throughfall
[4] Stemflow

۲-۳. شیمی مه‌بارش

برای بررسی ویژگی‌های شیمیایی مه‌بارش، از آب حاصل از چهار رخداد بارندگی همراه با مه که با ورود آب ناشی از مه‌بارش همراه بودند، نمونه‌برداری انجام شد. جمع‌آوری‌کننده‌های زیر تاج براساس شماره‌گذاری در پنج گروه (۱—۱۰، ۱۱—۲۰، ۲۱—۳۰، ۳۱—۴۰ و ۴۱—۵۰) و جمع‌آوری‌کننده‌های فضای باز در سه گروه (۱—۱۰، ۱۱—۲۰ و ۲۱—۳۰) دسته‌بندی شدند. پس از هر رخداد بارندگی، از ترکیب آب هر گروه، یک نمونهٔ ترکیبی با حجم ۳۰۰ میلی‌لیتر تهیه شد تا حجم کافی برای اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی فراهم شود. هدف از تهیهٔ نمونه‌های ترکیبی از ده جمع‌آوری‌کننده، قابلیت تعمیم نتایج، کاهش هزینه‌های آزمایشگاهی و جبران کم‌بودن حجم آب در برخی از رخدادها بود. نمونه‌ها پس از عبور از صافی، در ظروف تمیز جمع‌آوری و تا زمان انتقال به آزمایشگاه در یخچال نگهداری شدند [۱۰]. در آزمایشگاه، اسیدیته با دستگاه pH متر و هدایت الکتریکی با دستگاه EC متر برحسب میکروزیمنس بر سانتی‌متر ($\mu S\ cm^{-1}$) اندازه‌گیری شد [۱۰]. غلظت عناصر پتاسیم و سدیم با روش فلیم‌فتومتری و غلظت کلسیم و منیزیم با روش تیتراسیون کمپلکسومتری با EDTA تعیین شد [۱۵]. درنهایت، مقادیر به‌دست‌آمده به میلی‌اکی‌والان بر لیتر و سپس به واحد قسمت در میلیون (ppm) تبدیل شدند.

۲-۴. آنالیز داده‌ها

نرمال بودن داده‌ها با استفاده از آزمون شاپیرو-ویلک (Shapiro–Wilk) بررسی شد. به‌منظور مقایسهٔ میانگین غلظت عناصر غذایی، اسیدیته و هدایت الکتریکی بین نمونه‌های درون توده و خارج از تودهٔ جنگلی، در صورت نرمال بودن داده‌ها، از آزمون پارامتریک t مستقل (Independent Samples t-test) و در صورت نرمال نبودن داده‌ها از آزمون ناپارامتریک من-ویتنی (Mann–Whitney U test) استفاده شد. داده‌ها ابتدا در نرم‌افزار Microsoft Excel 2019 سازماندهی و سپس در نرم‌افزار IBM SPSS Statistics 26 تجزیه‌وتحلیل شدند.

۳. یافته‌های پژوهش و بحث

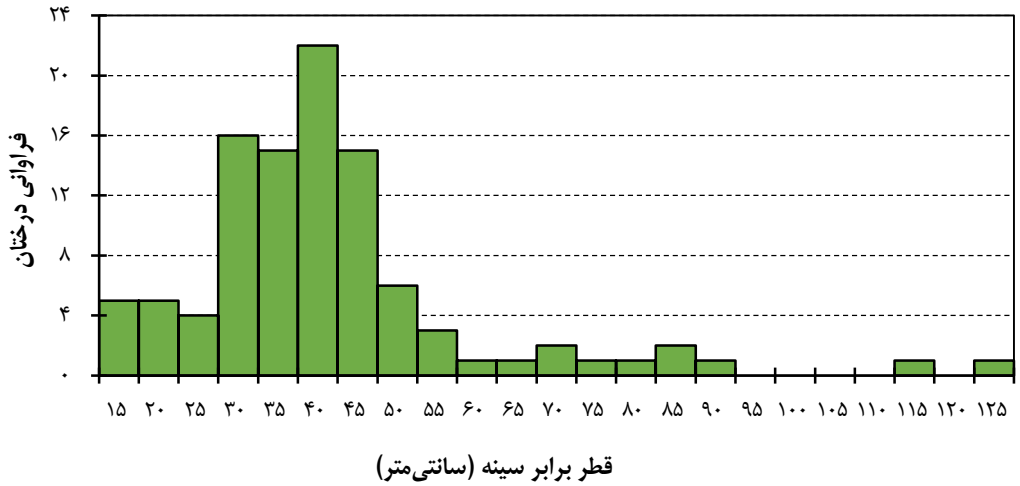
۳-۱. مشخصات جنگل‌شناسی تودهٔ مورد مطالعه

نتایج آماربرداری صددرصد نشان داد که تودهٔ مورد مطالعه با تراکم ۲۱۷ اصله در هکتار، از نظر ساختاری، خالص (با سهم سطح مقطع بیش از ۹۰ درصد گونه غالب)، ناهمسال و میانسال است (پایه‌های تیرک و برنا- قطرهای ۳۰ تا ۶۰ سانتی‌متر- در آن زیاد است) (براساس توزیع طبقات قطری، شکل ۳). تاج‌پوشش توده نیز بیش از ۸۰ درصد برآورد شد و توزیع قطری درختان نشان داد که ۷۰ درصد درختان در طبقهٔ قطری ۳۰ تا ۵۰ سانتی‌متر قرار دارند (شکل ۳). ویژگی‌های بیومتریک توده شامل میانگین قطر برابر سینه (±انحراف معیار) و ارتفاع درختان، به‌ترتیب (۱۸/۵±) ۴۱/۰ سانتی‌متر و (۴/۵±) ۱۹/۱ متر بود. همچنین، متوسط مساحت تاج‌پوشش درختان در توده، (۲۰/۸±) ۳۴/۲ مترمربع و میانگین شاخص سطح برگ توده، (۰/۳±) ۲/۸ اندازه‌گیری شد. تودهٔ مورد مطالعه، نمونه‌ای معرف برای پژوهش‌های اکولوژیک در مناطق کوهستانی جنگل‌های هیرکانی است [۲].

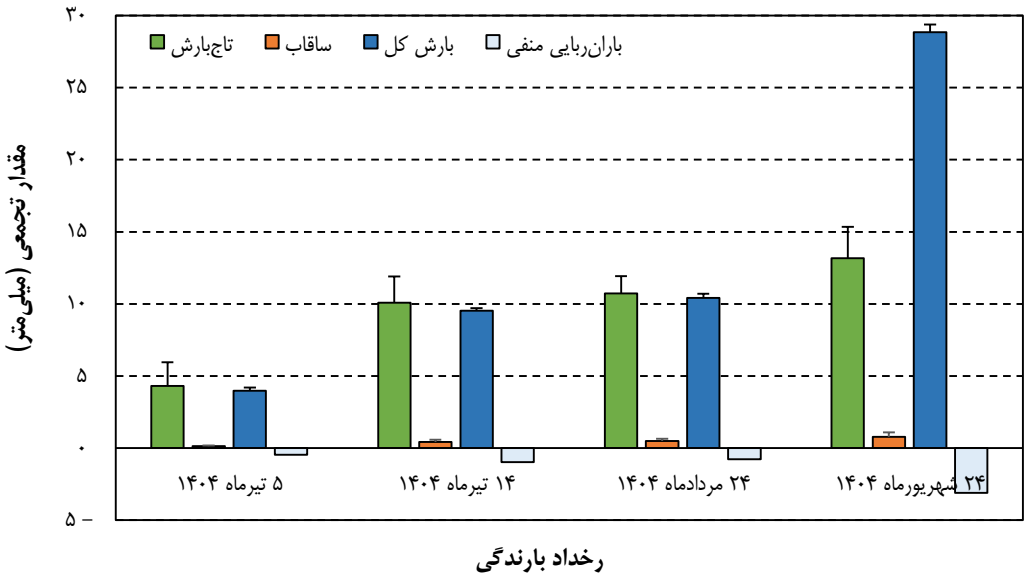
۳-۲. ارزیابی وقوع مه‌بارش

در طول دورهٔ پژوهش، ۱۱ رخداد بارندگی ثبت شد که هشت رخداد آن با حضور همزمان مه همراه بود. با این وجود، تنها در چهار رخداد از موارد یادشده، مه‌بارش به‌صورت ورودی آب قابل‌اندازه‌گیری ثبت شد. این الگو با نتایج Kavianpour و همکاران (۲۰۲۵) در جنگل‌های راش هیرکانی هم‌راستا است. آنان طی دو فصل رویشی، ۷۶ رخداد را ثبت کردند که ۸۰ درصد آن‌ها با مه همراه بود؛ با این‌حال، تنها حدود ۵۰ درصد رخدادهای مه‌آلود با مه‌بارش مؤثر یعنی با افزایش ورودی آب به توده گزارش شدند. بنابراین، حضور مه در رخدادهای بارش، الزاماً به افزایش ورودی آب ناشی از مه‌بارش منجر نمی‌شود و این فرآیند بسته به ویژگی‌های هر رخداد و شرایط پوشش جنگلی متفاوت است [۲]. تحلیل داده‌های اکوهیدرولوژیک در این ۴ رخداد نشان داد که مجموع مقادیر تاج‌بارش، ساقاب، بارندگی فضای باز و باران‌ربایی به‌ترتیب ۵۶/۳، ۱/۸، ۵۲/۸ و ۵/۳- میلی‌متر بود (شکل ۴). درنهایت، به‌دلیل

وقوع پدیدهٔ مه‌بارش، ۵/۳ میلی‌متر آب (معادل ۱۰/۱ درصد بارندگی فضای باز) به‌عنوان ورودی ناشی از مه‌بارش به این تودهٔ جنگلی افزوده شد. این مقدار با مطالعات انجام‌شده در جنگل‌های هیرکانی از نظر تأیید وقوع مه‌بارش همسو است، هرچند با مقادیر گزارش‌شده در پژوهش‌های مختلف تفاوت عددی قابل توجهی دارد. در پژوهش Kavianpour و همکاران (۲۰۲۵)، ۲۰/۳ میلی‌متر (۶/۵ درصد) ورودی آب ناشی از مه‌بارش ثبت شده است [۲]. این اختلاف ناشی از تفاوت در هدف و روش نمونه‌برداری است. Kavianpour و همکاران (۲۰۲۵) با تمرکز بر کمی‌سازی مه‌بارش، تمامی رخدادها را به‌طور پیوسته طی هر فصل رویش به‌طور کامل و مستمر ثبت کردند، در حالی‌که در پژوهش پیش‌رو، برخی رخدادها با هدف بررسی ویژگی‌های شیمیایی مه‌بارش نمونه‌برداری شدند. افزون بر این، تفاوت در شرایط اقلیمی سال‌های مطالعه، ازجمله فراوانی و تداوم مه و بارش، نیز می‌تواند بر سهم نسبی مه‌بارش اثرگذار باشد [۲، ۳].



شکل ۳. توزیع درختان راش براساس طبقات قطر برابر سینه در تودهٔ مورد مطالعه

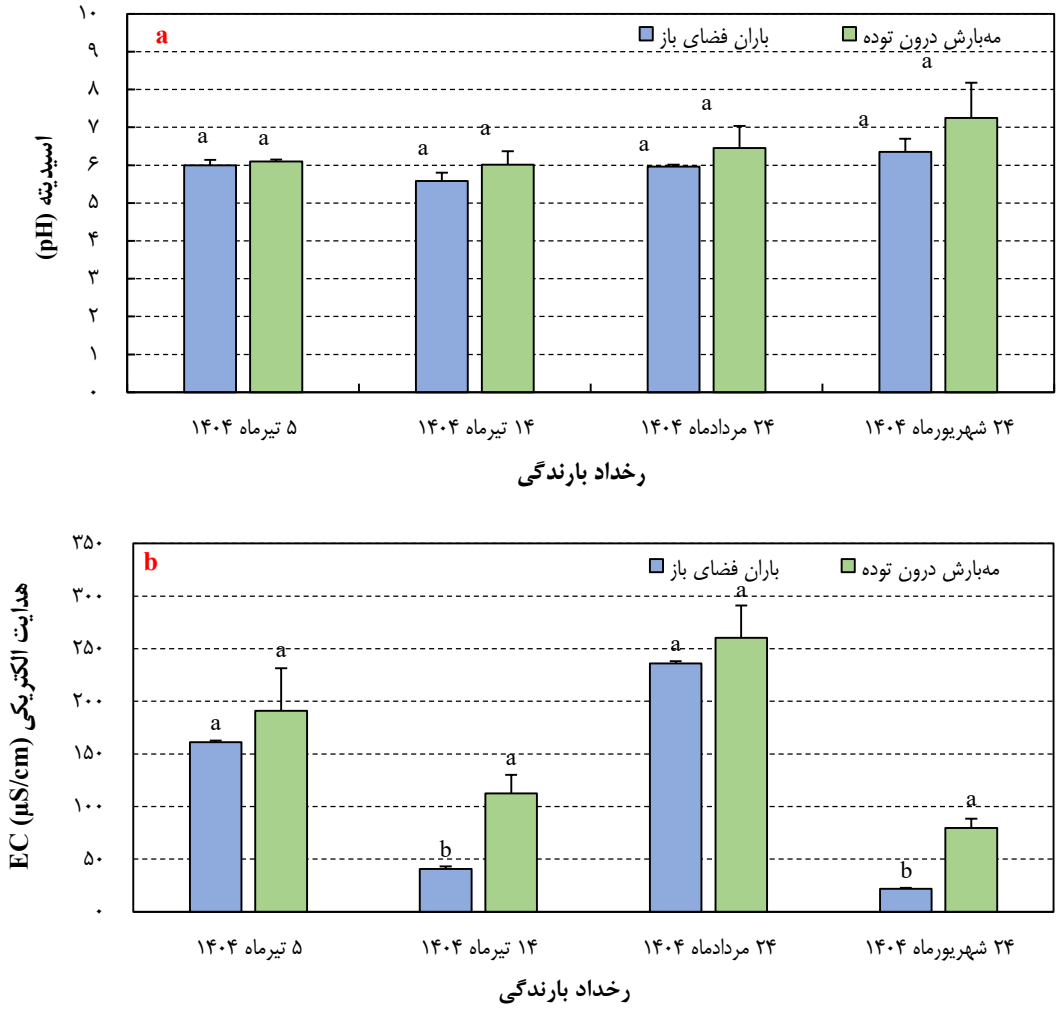


شکل ٤. توزیع اجزای بارندگی (باران‌ربایی منفی، بارش کل، ساقاب و تاج‌بارش) در چهار رخداد همراه با مه اندازه‌گیری شده در فصل رویش در تودهٔ مورد مطالعه. خطوط روی نمودار، مقدار انحراف معیار را نشان می‌دهد.

۳-۳. اسیدیته (pH) و هدایت الکتریکی (EC)

نتایج این پژوهش نشان داد که میانگین اسیدیتهٔ (pH) مه‌بارش جمع‌آوری‌شده در زیر تاج‌پوشش توده راش، در هیچ‌یک از رخدادهای بارشی بررسی‌شده، تفاوت آماری معنی‌داری با باران فضای باز نداشت ($P>۰/۰۵$) (شکل ۵-a). این یافته با نتایج Michna و همکاران (۲۰۱۵) در جنگل آمیختهٔ راش اروپایی (*F. sylvatica*) و نوئل (*Picea abies*) واقع در کوه نیسن سوئیس (در دو ارتفاع ۱۶۸۲ و ۲۳۰۰ متر) هم‌راستا است [۱۶]. این موضوع می‌تواند ناشی از غلظت پایین ترکیبات قابل شستشو از سطح تاج، ظرفیت بافری باران، رقیق‌شدن یون‌ها طی رخدادهای بارش و تعادل نسبی بین کاتیون‌ها و آنیون‌های ورودی به محلول باران باشد [۱۲، ۱۶].

در این مطالعه، میانگین هدایت الکتریکی مه‌بارش در رخدادهای دوم و چهارم (تیر و شهریور) نسبت به باران فضای باز تفاوت معنی‌دار و افزایشی نشان داد ($P<۰/۰۵$) (شکل ۵-b)، در حالی‌که در رخدادهای اول و سوم اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد. به‌طور کلی، هدایت الکتریکی شاخصی از غلظت کل یون‌های محلول در آب است؛ بنابراین، افزایش هدایت الکتریکی مه‌بارش در رخدادهای دوم و چهارم می‌تواند نشان‌دهندهٔ افزایش مقدار یون‌های محلول در قطرات مه باشد [۶، ۱۲، ۱۶]. مطالعات پیشین نیز نشان داده‌اند که مقدار هدایت الکتریکی به‌شدت تحت تأثیر شرایط جوی، منشأ تودهٔ هوا و غلظت یون‌های محلول قرار دارد و می‌تواند بین رخدادهای مختلف تغییرات قابل‌توجهی داشته باشد [۶، ۹].



شکل ۵. نمودار مقایسهٔ میانگین اسیدیته (شکل a) و هدایت الکتریکی (شکل b) مه‌بارش تودهٔ مورد مطالعه در مقایسه با باران فضای باز برای چهار رخداد بارندگی (تابستان سال ۱۴۰۴). هر خط روی نمودار، مقدار انحراف معیار را نمایش می‌دهد. حروف لاتین غیرمشابه، نشان‌دهندهٔ اختلاف معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۵ درصد با استفاده از آزمون t مستقل و من-ویتنی، برای هر رخداد به‌طور مجزا نشان داده شده است.

۳–۴. پتاسیم (K^+) و سدیم (Na^+)

یافته‌های این پژوهش نشان داد که غلظت عنصر پتاسیم در مه‌بارش نسبت به باران فضای باز در تمامی رخدادهای مورد بررسی، افزایش معنی‌داری داشت ($P<۰/۰۵$) (شکل ۶–a). بیشترین غلظت پتاسیم در نمونه‌های مه‌بارش متعلق به رخداد سوم (مردادماه) با مقدار میانگین (± انحراف معیار) (۶/۱±) ۲۱/۵ قسمت در میلیون بود، در حالی‌که بیشترین غلظت این عنصر در باران فضای باز مربوط به رخداد اول با مقدار (۰/۱±) ۴/۰ قسمت در میلیون مشاهده شد. در میان عناصر غذایی اندازه‌گیری‌شده، پتاسیم، بیشترین مقدار آبشویی از تاج‌پوشش گونهٔ راش را به‌خود اختصاص داد. این یافته‌ها با نتایج Michna و همکاران (۲۰۱۵) و Wang و همکاران (۲۰۱۹) درمورد گونه‌های نراد در جنگل سجیلا چین هم‌خوانی دارد [۹، ۱۶]. عبور همزمان باران و مه از تاج‌پوشش متراکم در فصل رویش و شدت زیاد آب‌شویی، از مهم‌ترین عوامل افزایش غلظت پتاسیم در مه‌بارش محسوب می‌شوند. همچنین، تحرک زیاد پتاسیم در بافت‌های گیاهی سبب می‌شود این عنصر در هنگام بارندگی به آسانی از برگ‌ها شسته شود [۱۱، ۱۷]. از این‌رو، افزایش تماس مه با تاج‌پوشش، ترشح پتاسیم از سطح برگ‌ها در دورهٔ رشد و شیب غلظت زیاد آن بین بافت‌های آوندی و آب باران، از منابع اصلی ورود پتاسیم به تاج‌بارش به‌شمار می‌روند [۹، ۱۲].

نتایج این مطالعه همچنین نشان داد که غلظت سدیم مه‌بارش در هر چهار رخداد مورد بررسی، تفاوت معنی‌داری با باران فضای باز داشت ($P<۰/۰۵$) (شکل ۶–b). بیشترین غلظت سدیم در رخداد سوم (مردادماه) مشاهده شد که مقدار آن در مه‌بارش (۰/۷±) ۳/۴ و در باران فضای باز (۰/۱±) ۵/۸ قسمت در میلیون بود. با این‌حال، جهت این تفاوت در همهٔ رخدادها یکسان نبود. در رخدادهای اول و سوم، غلظت سدیم در مه‌بارش، کمتر از باران فضای باز بود، در حالی‌که در رخدادهای دوم و چهارم افزایش غلظت سدیم در مه‌بارش مشاهده شد. کاهش غلظت سدیم در مه‌بارش رخدادهای اول و سوم ممکن است ناشی از کاهش ورود آئروسل‌های دریایی در نتیجه تغییر جهت باد یا منشأ تودهٔ هوا باشد. همچنین، افزایش حجم بارندگی می‌تواند با رقیق‌سازی یون‌های محلول، غلظت سدیم را کاهش دهد. از سوی دیگر، مه یا بارندگی پیشین نیز ممکن است با شستشوی سدیم انباشته بر سطح برگ‌ها، ذخیرهٔ این عنصر را در تاج‌پوشش کاهش داده باشد. درمجموع، افت سدیم می‌تواند حاصل برهم‌کنش همزمان این سه عامل باشد.

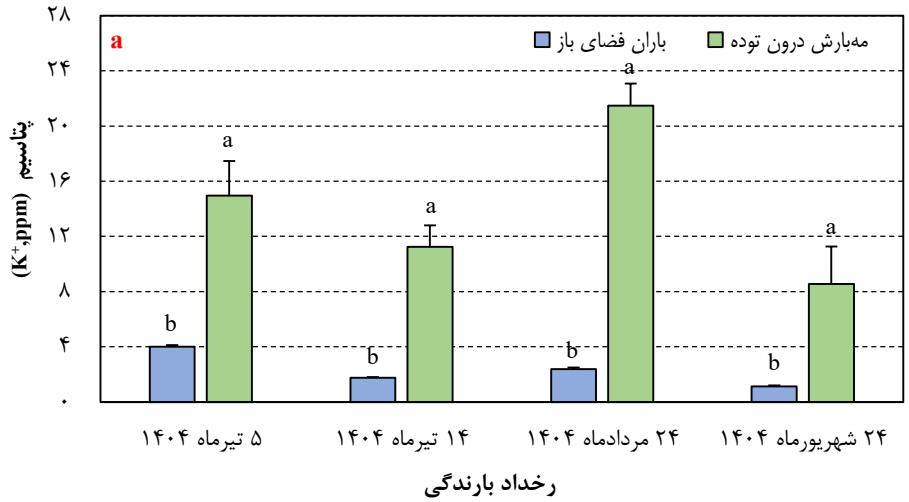
درمقابل، افزایش غلظت سدیم در رخدادهای دوم و چهارم با نتایج بسیاری از مطالعات پیشین همخوانی دارد که غلظت بیشتر سدیم در مه‌بارش نسبت به باران فضای باز را گزارش کرده‌اند [۱۲، ۱۸]. این افزایش را می‌توان به نزدیکی منطقهٔ مورد مطالعه به دریای خزر، انتقال آئروسل‌ها و رسوبات دریایی توسط باد و شستشوی یون‌های سطح برگ‌ها نسبت داد. سدیم اغلب منشأ دریایی دارد و به‌دلیل حلالیت زیاد، به‌آسانی در قطرات مه و باران حل شده و از طریق مه‌بارش به کف جنگل هدایت می‌شود [۹، ۱۷، ۱۸].

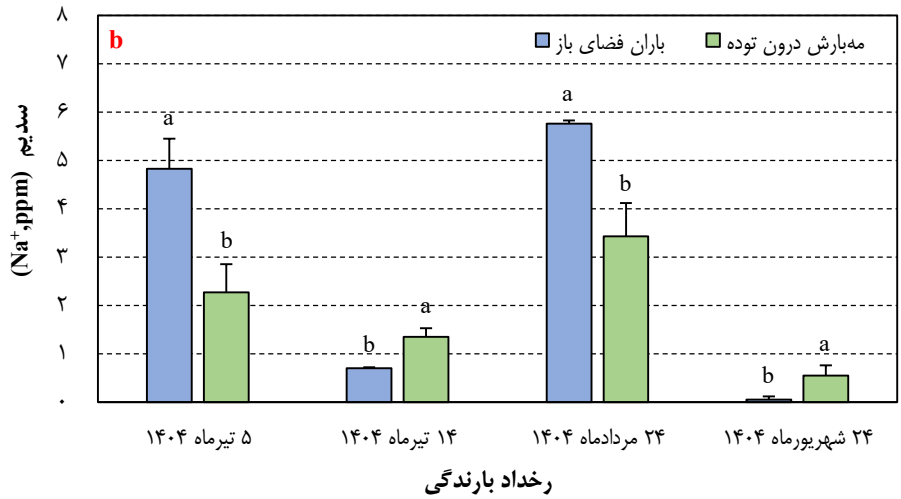
۳–۵. کلسیم (Ca^{2+}) و منیزیم (Mg^{2+})

نتایج این پژوهش نشان داد که غلظت کاتیون کلسیم در مه‌بارش نسبت به باران فضای باز در تمامی رخدادهای مورد بررسی، تفاوت معنی‌داری داشت ($P<۰/۰۵$) (شکل ۷–a). غلظت این عنصر در رخدادهای دوم و چهارم، نسبت به باران فضای باز بیشتر و در رخدادهای اول و سوم، کمتر بود. بیشترین غلظت کلسیم در رخداد سوم (مردادماه) مشاهده شد که مقدار آن در مه‌بارش (۲/۷±) ۱۴/۵ قسمت در میلیون بود، در حالی‌که حداکثر غلظت این عنصر در باران فضای باز در همین رخداد برابر با (۰/۵±) ۲۴/۲ قسمت در میلیون ثبت شد. افزایش معنی‌دار غلظت کلسیم در رخدادهای دوم و چهارم می‌تواند ناشی از غلبهٔ فرآیندهای آبشویی و شستشوی ذخایر محلول سطح برگ‌ها و رسوبات انباشته بر تاج‌پوشش باشد [۹، ۱۶]. این نتایج با یافته‌های Michna و همکاران (۲۰۱۵) و Wangو همکاران (۲۰۱۹) نیز هم‌راستا است [۹، ۱۶]. در مقابل، کاهش غلظت کلسیم در رخدادهای اول و سوم می‌تواند به غلبهٔ فرآیندهایی مانند جذب سطحی، تبادل کاتیونی و نگهداشت آب سطح برگ نسبت داده شود [۱۲]. درمجموع، این نتایج نشان می‌دهد که غلظت کلسیم محلول در مه‌بارش تحت تأثیر همزمان شرایط هر رخداد، ویژگی‌های تاج‌پوشش، نهشت خشک و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی مه‌بارش قرار دارد [۱۲، ۱۳].

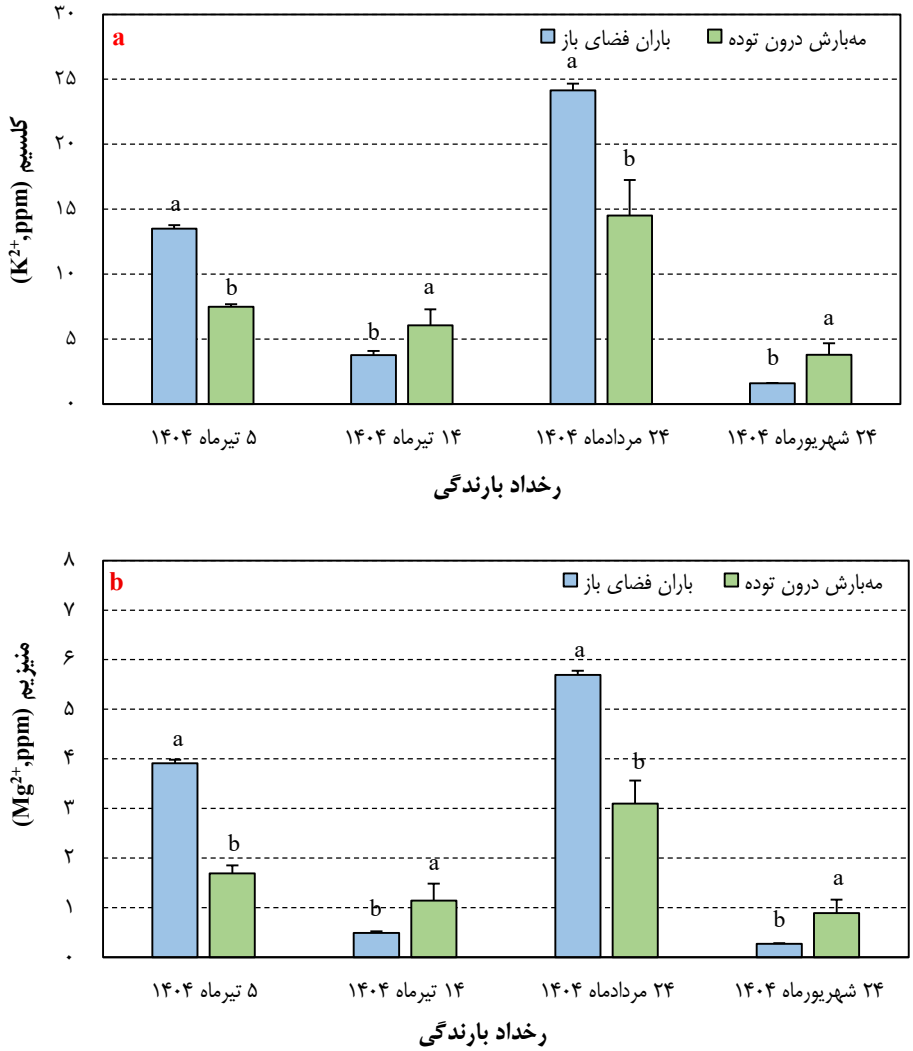
نتایج این مطالعه همچنین نشان داد که غلظت منیزیم مه‌بارش نیز در هر چهار رخداد مطالعه شده تفاوت معنی‌دار با باران فضای باز داشت ($P<۰/۰۵$) (شکل ۷–b). بیشترین غلظت این عنصر در رخداد سوم (مردادماه) مشاهده شد. مقدار آن در مه‌بارش، (۰/۵±) ۳/۱ قسمت در میلیون بود، در حالی‌که حداکثر غلظت این عنصر در باران فضای باز در همین رخداد برابر با (۰/۱±) ۵/۷

قسمت در میلیون ثبت شد. در رخدادهای اول و سوم، غلظت منیزیم در مه‌بارش به‌طور معنی‌داری کمتر از باران فضای باز بود. این مسئله می‌تواند ناشی از غلبهٔ فرآیندهای رقیق‌سازی، جذب سطحی و نگهداشت موقت یون‌های منیزیم بر سطح برگ‌ها و اندام‌های هوایی باشد [۱۹]. در مقابل، در رخدادهای دوم و چهارم، افزایش معنی‌دار غلظت منیزیم نسبت به باران فضای باز مشاهده شد که نشان‌دهندهٔ غلبه فرآیند آبشویی این عنصر از سطح برگ‌ها و اندام‌های گیاهی است. این مسئله در مطالعات پیشین نیز برای منیزیم گزارش شده است [۱۹، ۲۰]. افزون بر این، بخشی از منیزیم موجود در مه‌بارش می‌تواند ناشی از ذرات آئروسل دریایی منتقل‌شده توسط باد باشد، زیرا در بوم‌سازگان‌های کوهستانی نزدیک به دریا، مانند تودهٔ مورد مطالعه، رسوبات نمکی دریایی می‌توانند سهم قابل‌توجهی در ورودی منیزیم داشته باشند [۷، ۹، ۱۲]. بنابراین، الگوی مشاهده‌شده در پژوهش پیش‌رو می‌تواند حاصل برهم‌کنش همزمان سه سازوکار اصلی، یعنی رسوب‌گذاری دریایی، تبادل تاج‌پوشش و آبشویی از سطح برگ است.





شکل ٦. نمودار مقایسهٔ میانگین پتاسیم (شکل a) و سدیم (شکل b) مه‌بارش تودهٔ مورد مطالعه در مقایسه با باران فضای باز برای چهار رخداد بارندگی (تابستان سال ۱۴۰۴). هر خط روی نمودار، مقدار انحراف معیار را نمایش می‌دهد. حروف لاتین غیرمشابه، نشان‌دهندهٔ اختلاف معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۵ درصد با استفاده از آزمون t مستقل و من–ویتنی، برای هر رخداد به‌طور مجزا نشان داده شده است.



شکل ۷. نمودار مقایسهٔ میانگین کلسیم (شکل a) و منیزیم (شکل b) مه‌بارش تودهٔ مورد مطالعه در مقایسه با باران فضای باز برای چهار رخداد بارندگی (تابستان سال ۱۴۰۴). هر خط روی نمودار، مقدار انحراف معیار را نمایش می‌دهد. حروف لاتین غیرمشابه، نشان‌دهندهٔ اختلاف معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۵ درصد با استفاده از آزمون t مستقل و من–ویتنی، برای هر رخداد به‌طور مجزا نشان داده شده است.

۴. نتیجه‌گیری

به‌طور کلی، نتایج این پژوهش نشان داد که مه‌بارش در توده خالص راش شرقی بالابند جنگل‌های هیرکانی می‌تواند یکی از مسیرهای ورود عناصر غذایی به بوم‌سازگان جنگل باشد. یافته‌ها نشان داد که تاج‌پوشش راش خالص اثر معنی‌داری بر pH مه‌بارش نداشت، با این‌حال، هدایت الکتریکی و غلظت برخی عناصر غذایی در برخی رخدادها تحت تأثیر تاج‌پوشش قرار گرفتند. در این میان، پتاسیم الگوی ثابتی از افزایش معنی‌دار در همهٔ رخدادها نشان داد که بیانگر آبشویی شدید این عنصر از تاج‌پوشش راش و تحرک زیاد آن در بافت‌های گیاهی است. در مقابل، کلسیم، منیزیم و سدیم رفتار یکنواختی نداشتند و بسته به رخداد، کاهش یا افزایش معنی‌دار را نشان دادند؛ این مسئله بیانگر پیچیدگی فرآیندهای مؤثر بر ترکیب شیمیایی مه‌بارش ازجمله آبشویی، جذب سطحی، تبادل کاتیونی، رقیق‌شدن یون‌ها و سهم متفاوت نهشت‌های دریایی و جوی است. به‌طور کلی، نتایج این پژوهش می‌تواند در بهبود برآورد ورودی عناصر غذایی به جنگل‌های بالابند هیرکانی و ارزیابی نقش تاج‌پوشش در تعدیل ترکیب شیمیایی باران مورد استفاده قرار گیرد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد، مه‌بارش می‌تواند یکی از مسیرهای مهم ورود عناصر غذایی به جنگل‌های بالابند راش باشد و از این‌رو، در پایش سلامت توده‌های راش و برنامه‌ریزی مدیریتی این بوم‌سازگان‌ها قابل استفاده است. همچنین،

انجام پژوهش‌های بیشتر با تعداد رخدادهای بارندگی بیشتر، مقایسه رخدادهای باران همراه با مه و باران بدون مه و ارزیابی مه‌بارش در توده‌های خالص و آمیخته راش در ارتفاعات مختلف، می‌تواند درک دقیق‌تری از نقش مه‌بارش و تأثیر ساختار تاج‌پوشش و فصل بر بودجهٔ عناصر غذایی جنگل‌های بالابند هیرکانی فراهم کند.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نمودند و این موضوع مورد تایید آن‌ها می‌باشد.

تعارض منافع

بنا به اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

حامی مالی

این پژوهش با حمایت مالی و معنوی معاونت پژوهشی دانشگاه تهران و دانشکدهٔ منابع طبیعی انجام شده است. هزینه‌های آن در قالب پژوهانه دانشجویی نویسنده اول و پژوهانه سایر نویسندگان پرداخت گردیده است.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: کیمیا مصطفی‌نژاد نشلی، انجام آزمایش‌ها، انجام محاسبات، تجزیه‌وتحلیل آماری داده‌ها، تحلیل و تفسیر نتایج و نیز تهیه پیش‌نویس مقاله.

نویسنده دوم: پدرام عطارد، استاد راهنما، پیشنهاد اولیه موضوع پژوهش، نظارت بر مراحل انجام پژوهش، بررسی و کنترل نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله.

نویسنده سوم: وحید اعتماد، مشارکت در طراحی پژوهش، مطالعه و بازبینی مقاله.

نویسنده چهارم: عاطفه دژبان، مشارکت در طراحی پژوهش، مطالعه و بازبینی مقاله.

نویسنده پنجم: محمدصادق کاویانپور، نصب و آماده‌سازی جمع‌آوری‌کننده‌های باران، جمع‌آوری و انتقال نمونه‌ها از عرصه به آزمایشگاه، کمک در تحلیل و تفسیر نتایج و نیز همکاری در تهیه و اصلاح پیش‌نویس مقاله.

نویسنده ششم: سمیه میرزایی، کمک در تهیه پیش‌نویس مقاله.

نویسنده هفتم: احسان عبدی، مشاوره در تجزیه‌وتحلیل آماری داده‌ها

بیانیه دسترسی به داده‌ها

داده‌های این پژوهش با ارسال درخواست به نویسندگان، در اختیار پژوهشگران قرار می‌گیرد.

سپاسگزاری

از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه تهران به‌خاطر حمایت مالی، حمایت معنوی و همکاری در اجرای این پژوهش سپاسگزاری می‌شود.

References

[1] Sagheb Talebi, K., Sajedi, T. & Pourhashemi, M. (2014). *Forests of Iran: A Treasure from the Past, a Hope for the Future* (No. 15325). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-007-7371-4

[2] Kavianpour, M.S., Attarod, P., Zhu, H., Pypker, T.G., Dezhban, A., Etemad, V. & Bayramzadeh, V. (2025). Fog Precipitation Plays a Significant Role in Providing Moisture to the Caspian High Latitude Forests of Northern Iran. *Ecohydrology*, 18(5), e70052. https://doi.org/10.1002/eco.70052

[3] Dezhban, A., Attarod, P., Holscher, D. & Holder, C.D. (2023). Spatial variability of throughfall in heavily fogged old-growth *Fagus orientalis* forests is controlled by fog precipitation and stand structural characteristics. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 23(3), 457-468. https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2023.04.003

[4] Wang, L., Li, Y., Sun, M. & Qiao, N. (2026). The underappreciated roles of fog and dew on vegetation and biocrusts. *New Phytologist*, 251(1), 46-63. https://doi.org/10.1111/nph.71189

[5] Dezhban, A., Attarod, P., Zahedi Amiri, G., Grant Pypker, T. & Nanko, K. (2019). Fog precipitation and rainfall interception in a pure natural oriental beech (*Fagus orientalis* L.) stand in the Hyrcanian Forests, North of Iran. *Forest and Wood Products*, 72(2), 89-100. [In Persian] https://doi.org/10.22059/jfwp.2019.267717.970

[6] Blas, M., Polkowska, Z., Sobik, M., Klimaszewska, K., Nowinski, K. & Namiesnik, J. (2010). Fog water chemical composition in different geographic regions of Poland. *Atmospheric Research*, 95(4), 455-469. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2009.11.008

[7] Mochizuki, T., Kawamura, K., Yamaguchi, T. & Noguchi, I. (2020). Distributions and sources of water-soluble organic acids in fog water from mountain site (Lake Mashu) of Hokkaido, Japan. *Geochemical Journal*, 54(5), 315-326. https://doi.org/10.2343/geochemj.2.0601

[8] Yamaguchi, T., Katata, G., Noguchi, I., Sakai, S., Watanabe, Y., Uematsu, M., & Furutani, H. (2015). Long-term observation of fog chemistry and estimation of fog water and nitrogen input via fog water deposition at a mountainous site in Hokkaido, Japan. *Atmospheric Research*, 151, 82-92. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2014.01.023

[9] Wang, W., Xu, W., Collett Jr, J. L., Liu, D., Zheng, A., Dore, A.J. & Liu, X. (2019). Chemical compositions of fog and precipitation at Sejila Mountain in the southeast Tibetan Plateau, China. *Environmental Pollution*, 253, 560-568. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.07.055

[10] Tafazoli, M., Attarod, P., Hojjati, S.M. & Tafazoli, M. (2020). Throughfall chemistry of Persian maple (*Acer velutinum*) and Turkish pine (*Pinus brutia*) plantations in eastern Mazandaran. *Iranian Journal of Forest Ecology*, 7(14), 39-47. [In Persian] http://ifej.sanru.ac.ir/article-1-100-en.html

[11] Moslehi, M., Habashi, H. & Khormali, F. (2011). Effect of throughfall and forest floor leachate of beech on base cation dynamics in mixed stand. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 19(1), 83-93 [In Persian] https://doi.org/10.22092/ijfpr.2011.107609

[12] Abe, M., Oniwa, S., Okochi, H. & Aikawa, M. (2022). Fog water, throughfall, and bulk precipitation chemistry and a newly developed methodology for the estimation of fog water deposition. *Water, Air, & Soil Pollution*, 233(11), 474. https://doi.org/10.1007/s11270-022-05939-5

[13] Wang, W. & Ge, M. (2026). Nitrogen form differed significantly between fogwater and rainwater in the high-altitude areas of southeastern Tibet. *Atmospheric Pollution Research*, 102929. https://doi.org/10.1016/j.apr.2026.102929

[14] Salehi, M., Zahedi Amiri, G., Attarod, P., Salehi, A., Brunner, I., Schleppi, P. & Thimonier, A. (2016). Seasonal variations of throughfall chemistry in pure and mixed stands of Oriental beech (*Fagus orientalis* Lipsky) in Hyrcanian forests (Iran). *Annals of Forest Science*, 73(2): 371-380. https://doi.org/10.1007/s13595-015-0525-2

[15] Smith, J.L. & Doran, J.W. (1997). Measurement and use of pH and electrical conductivity for soil quality analysis. In: *Methods for Assessing Soil Quality*, 49, 169-185. https://doi.org/10.2136/sssaspecpub49.c10

[16] Michna, P., Werner, R.A. & Eugster, W. (2015). Does fog chemistry in Switzerland change with altitude? *Atmospheric Research*, 151, 31-44. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2014.02.008

[17] Su, L., Zhao, C., Xu, W. & Xie, Z. (2019). Hydrochemical fluxes in bulk precipitation, throughfall, and stemflow in a mixed evergreen and deciduous broadleaved forest. *Forests*, 10(6), 507. https://doi.org/10.3390/f10060507

[18] Imamura, N., Ohte, N. & Tanaka, N. (2024). Factors influencing the difference in dissolved ion inputs to the forest floor between deciduous and coniferous stands: comparison under high and low atmospheric deposition conditions. *Environmental Monitoring and Assessment*, 196(1): 1. https://doi.org/10.1007/s10661-023-12132-6

[19] Xu, Q., Wu, F., Peng, Y., Hedenec, P., Ni, X., Tan, S., Huang, Y. & Yue, K. (2023). Effects of forest transformation on the fluxes of potassium, calcium, sodium, and magnesium along with rainfall partitioning. *Polish Journal of Environmental Studies*, 32(5), 4341-4351. https://doi.org/10.15244/pjoes/168103

[20] Lin, T.C., Hamburg, S.P., Hsia, Y.J., King, H.B., Wang, L.J. & Lin, K.C. (2001). Base cation leaching from the canopy of a subtropical rainforest in northeastern Taiwan. *Canadian Journal of Forest Research*, 31(7), 1156-1163. https://doi.org/10.1139/x01-035