

Research Article

A loblolly pine (*Pinus taeda* L.) reforestation inside a natural hornbeam (*Carpinus betulus* L.) stand changes stemflow nutrient inputs

Pedram Pourmokhtari¹, Pedram Attarod^{2*}, Vahid Etemad³ and Turaj Safarkar⁴

1- M.Sc. in Silviculture and Forest Ecology, Department of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

2*- Corresponding author, Prof., Department of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: attarod@ut.ac.ir

3- Associate Prof., Department of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

4- M.Sc. in Forestry, General Department of Natural Resources and Watershed Management, Guilan Province, Rasht, Iran

Received: 31.08.2025

Revised: 04.12.2025

Accepted: 06.12.2025

Abstract

Background and objectives: The plantation of native and exotic tree species affects not only the quantity of rainfall that passed through the leaves and branches and reached the forest floor but also its quality significantly alters. Stemflow (SF), as the part of rainfall that reaches the forest floor after hitting the tree canopy, plays a key role in supplying soil moisture and nutrients. This study aimed to determine how reforestation with the exotic loblolly pine (*Pinus taeda* L.) has changed the stemflow nutrient composition, compared to natural stands of hornbeam (*Carpinus betulus* L.) in the western part of Hyrcanian region in northern Iran.

Methodology: This study was conducted in Astara city, Iran, where the mean annual precipitation is 1390 mm and the mean annual temperature is 15.7 °C. SF was sampled during three rainfall events in the summer of 2022 from a natural *C. betulus* and a man-made *P. taeda* stand. Rainfall was also collected. The pH and electrical conductivity (EC) of the samples were measured, and concentrations of calcium (Ca⁺⁺), magnesium (Mg⁺⁺), potassium (K⁺), and sodium (Na⁺) were analyzed. The Kolmogorov-Smirnov (KS) test was used to assess data normality, and a linear mixed-effects model was employed for statistical analysis.

Results: The mixed-effects model showed that stand type had a significant effect on all measured parameters ($P < 0.05$). The pH was lower in SF of *P. taeda* (5.4) than that of *C. betulus* (6.9) and rainfall (7.1). The EC of SF was higher in both hornbeam (183 µS/cm, a 268% increase) and *P. taeda* (132 µS/cm, a 167% increase) compared to rainfall (50 µS/cm). The Ca⁺⁺ concentration was higher in both *C. betulus* (17.8 mg/L, a 140% increase) and *P. taeda* (13.9 mg/L, an 88% increase) than in rainfall (7.4 mg/L). The Mg⁺⁺ concentration showed a 26% increase in *C. betulus* (9.1 mg/L). The K⁺ concentration was higher in SF of *C. betulus* (30.8 mg/L, a 470% increase) than in that of *P. taeda* (19.8 mg/L, a 267% increase) and rainfall (5.4 mg/L). The Na⁺ concentration increased in the SF of both species (*C. betulus*: 16.8 mg/L, a 121% increase; *P. taeda*: 16.4 mg/L, a 116% increase) relative to rainfall. The percentage of parameters showing significant changes compared to rainfall was 75-80% in



the *C. betulus* stand and 65-70% in the *P. taeda* stand, whereas the difference between the two stands was 80%.

Conclusion: Replacing natural *C. betulus* stands with *P. taeda* significantly altered SF chemistry by increasing acidity and decreasing nutrient richness. This alteration may weaken SF's crucial role in soil nutrition and the formation of moist, nutrient-rich islands around tree bases. Consequently, these changes could potentially influence the biogeochemical cycle and soil health within the Hyrcanian ecosystem.

Keywords: Electrical conductivity, forest ecosystem, nutrient elements, reforestation.

جنگل کاری کاج تدا (*Pinus taeda* L.) در توده طبیعی ممرز (*Carpinus betulus* L.)، عناصر غذایی ساق آب را تغییر می دهد.

پدرام پورمختاری^۱، پدرام عطارد^{۲*}، وحید اعتماد^۳ و تورج سفرکار^۴

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه جنگل داری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

۲- نویسنده مسئول، استاد، گروه جنگل داری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

پست الکترونیک: attarod@ut.ac.ir

۳- دانشیار، گروه جنگل داری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

۴- کارشناس ارشد، اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان گیلان، رشت، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۱۵

تاریخ اصلاح: ۱۴۰۴/۰۹/۱۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۱۰

چکیده

سابقه و هدف: کاشت گونه های بومی و غیربومی نه تنها بر مقدار بارش رسیده به کف جنگل تأثیر می گذارد، بلکه کیفیت آن را نیز به طور قابل توجهی تغییر می دهد. ساق آب به عنوان بخشی از بارش که پس از برخورد به تاج پوشش درختان در میان برگ ها و شاخه ها جریان می یابد و به کف جنگل می رسد، نقش کلیدی در تأمین رطوبت و مواد مغذی خاک ایفا می کند. این پژوهش با هدف بررسی تأثیر جنگل کاری با گونه غیربومی کاج تدا (*Pinus taeda* L.) بر تغییر عناصر غذایی ساق آب در مقایسه با توده های طبیعی ممرز (*Carpinus betulus* L.) در غرب ناحیه هیرکانی انجام گرفت.

مواد و روش ها: پژوهش پیش رو در شهر آستارا با میانگین بارندگی سالانه ۱۳۹۰ میلی متر و دمای متوسط سالانه ۱۵/۷ درجه سانتی گراد انجام شد. نمونه برداری از ساق آب در دو توده طبیعی ممرز و دست کاشت تدا و نیز از باران در طول سه رخداد بارندگی در فصل تابستان سال ۱۴۰۱ صورت گرفت. اسیدیته، هدایت الکتریکی و غلظت عناصر غذایی شامل کلسیم، منیزیم، پتاسیم و سدیم ساق آب و باران اندازه گیری و مقایسه شدند. داده ها با آزمون کولموگروو-سمیرنوف (KS) برای نرمال بودن بررسی شدند و با مدل خطی اثرات مختلط تحلیل شدند.

نتایج: مدل اثرات مختلط نشان داد که نوع توده بر همه پارامترها، تأثیر معنی دار دارد ($P < 0.05$). اسیدیته ساق آب در تدا (۵/۴) کمتر از ممرز (۶/۹) و باران (۷/۱) بود. هدایت الکتریکی در ساق آب ممرز (۱۸۳ $\mu\text{S}/\text{cm}$)، افزایش ۲۶۸ درصدی و در ساق آب تدا (۱۳۲ $\mu\text{S}/\text{cm}$)، افزایش ۱۶۷ درصدی نسبت به باران (۵۰ $\mu\text{S}/\text{cm}$) داشت. کلسیم در ساق آب ممرز (۱۷/۸ mg/L) با افزایش ۱۴۰ درصدی و در ساق آب تدا (۱۳/۹ mg/L) با افزایش ۸۸ درصدی بیشتر از باران (۷/۴ mg/L) اندازه گیری شد. منیزیم نیز در ساق آب ممرز، افزایش ۲۶ درصدی (۹/۱ mg/L) نسبت به باران نشان داد. بیشترین افزایش غلظت مواد مغذی ساق آب توده ها نسبت به باران در پتاسیم مشاهده شد. به طوری که این عنصر در ساق آب ممرز (۳۰/۸ mg/L) با افزایش ۴۷۰ درصدی و در ساق آب تدا (۱۹/۸ mg/L) با افزایش ۲۶۷ درصدی نسبت به باران (۵/۴ mg/L) اندازه گیری شد. سدیم نیز در ساق آب ممرز (۱۶/۸ mg/L) افزایش ۱۲۱ درصدی و در ساق آب تدا (۱۶/۴ mg/L) افزایش ۱۱۶ درصدی نسبت به باران نشان داد. تغییرات معنی دار در عناصر غذایی دو توده نسبت به باران در مجموع، ۷۵ تا ۸۰ درصد در ساق آب توده ممرز، ۶۵ تا ۷۰ درصد در ساق آب توده تدا و تفاوت بین توده ها نیز ۸۰ درصد بود. نتیجه گیری کلی: جایگزینی توده های طبیعی ممرز با کاج تدا سبب تغییر معنی دار عناصر غذایی، اسیدیته و هدایت الکتریکی ساق آب می شود. چنانچه اسیدی تر کردن و کاهش غنای غذایی ساق آب می تواند نقش کلیدی آن در تغذیه خاک و تشکیل جزیره مرطوب و مغذی پای درختان را تضعیف کند. این تغییرات به احتمال زیاد می تواند چرخه زیست زمین شیمیایی و سلامت و کیفیت خاک بوم سازگان هیرکانی را به مرور زمان تحت تأثیر قرار دهد.

واژه های کلیدی: بوم سازگان جنگلی، جنگل کاری، عناصر غذایی، هدایت الکتریکی.

جدول ۱- مروری بر پژوهش‌های انجام‌شده در رابطه با مقایسه اسیدیته، هدایت الکتریکی و نیز مقادیر عناصر غذایی کلسیم، منیزیم، پتاسیم و سدیم در ساق آب با باران

Table 1. A review of research studies on comparison of pH, EC, and nutrient elements of Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, K⁺, and Na⁺ of stemflow compared with rainfall

References	Scientific Name	Study Area	Geographical Coordinates	Altitude (m.a.s.l.)	Mean rainfall (mm)	Acidity		Electrical conductivity (μs/cm)		Calcium (mg/L)		Magnesium (mg/L)		Potassium (mg/L)		Sodium (mg/L)	
						Rainfall (Rf)	Stemflow (SF)	Rf	SF	Rf	SF	Rf	SF	Rf	SF	Rf	SF
Chiwa et al. (2003)	<i>Pinus densiflora</i> Siebold & Zucc.	Hatsukaichi	34° 20' 132° 19'	661	1825	4.7	4.8	-	-	6.5	21.8↑	4.5	12.3↑	2.5	23.4↑	6.6	18.8↑
Attarod et al. (2019)	<i>Picea abies</i> (L.) H.Karst.	Savadkuh	36° 15' 53° 10'	1000	512	7.3	6.5↓	80	140↑	6	15↑	0.6	1.2↑	4	14↑	8	17↑
Attarod et al. (2019)	<i>Fagus orientalis</i> Lipsky	Savadkuh	36° 15' 53° 10'	1000	512	7.3	7	80	120↑	6	10↑	0.6	1.4↑	4	13↑	8	14↑
Su et al. (2019)	<i>Cyclobalanopsis multinervis</i> W.C.Cheng & T.Hong ¹	Hubei	31° 18' 110° 41'	1650	1350	7.4	7.5	4.7	14.3↑	0.7	2.2↑	0.09	0.5↑	0.4	4.1↑	0.1	0.2↑
Su et al. (2019)	<i>Cyclobalanopsis oxyodon</i> (Miq.) Oerst. ²	Hubei	31° 18' 110° 41'	1650	1350	7.4	7.6	4.7	14.3↑	0.7	2.2↑	0.09	0.4↑	0.4	4↑	0.1	0.2↑
Su et al. (2019)	<i>Fagus engleriana</i> Seemen ex Diels	Hubei	31° 18' 110° 41'	1650	1350	7.4	7.7	4.7	14.9↑	0.7	2.5↑	0.09	0.3↑	0.4	5.2↑	0.1	0.4↑

References	Scientific Name	Study Area	Geographical Coordinates	Altitude (m.a.s.l.)	Mean rainfall (mm)	Acidity		Electrical conductivity (µs/cm)		Calcium (mg/L)		Magnesium (mg/L)		Potassium (mg/L)		Sodium (mg/L)	
						Rainfall (Rf)	Stemflow (SF)	Rf	SF	Rf	SF	Rf	SF	Rf	SF	Rf	SF
Su et al. (2019)	<i>Quercus serrata</i> Murray	Hubei	31° 18' 110° 41'	1650	1350	7.4	7.8	4.7	16.3↑	0.7	3↑	0.09	0.4↑	0.4	5↑	0.1	0.5↑
Nsien et al. (2021)	<i>Diospyros crassiflora</i> Hiern	Omaha	5° 31' 7° 29'	122	2238	5.3	5	-	-	65.1	71	158	159.7	10.6	11.6	127	127
Jana et al. (2021)	<i>Cedrus deodara</i> (Roxb. ex D.Don) G.Don	Uttarakhand	29° 31' 79° 11'	1800	1600	7.1	6.4↓	63	215↑	2.5	5.3↑	-	-	1.7	14.1↑	1.3	4.6↑
Jana et al. (2021)	<i>Quercus leucotrichophora</i> A.Camus	Uttarakhand	29° 31' 79° 11'	1800	1600	7.1	7	63	175↑	2.5	7.2↑	-	-	1.7	22.3↑	1.3	6.1↑
Chen et al. (2022)	<i>Cinnamomum camphora</i> (L.) J.Presl ³	Chongqing	29° 37' 106° 41'	500	1150	6.8	6.1↓	85	212↑	5.3	6.3↑	0.8	1	2.2	4.4↑	2.3	4↑
Chen et al. (2022)	<i>Pinus massoniana</i> Lamb.	Chongqing	29° 37' 106° 41'	500	1150	6.8	5↓	85	475↑	5.3	7.9↑	0.8	1.9↑	2.2	5.5↑	2.3	4.3↑
Jochheim et al. (2022)	<i>Fagus sylvatica</i> L.	Brandenburg	13° 24' 52° 30'	50-100	550	5.7	5.5	55	40↓	1.8	1.2↓	-	-	3	2↓	-	-

References	Scientific Name	Study Area	Geographical Coordinates	Altitude (m.a.s.l.)	Mean rainfall (mm)	Acidity		Electrical conductivity (µs/cm)		Calcium (mg/L)		Magnesium (mg/L)		Potassium (mg/L)		Sodium (mg/L)	
						Rainfall (Rf)	Stemflow (SF)	Rf	SF	Rf	SF	Rf	SF	Rf	SF	Rf	SF
Xu et al. (2023)	<i>Castanopsis carlesii</i> (Hemsl.) Hayata	Fujian	26° 04' 119° 18'	100	1700	5.5	5↓	50	120↑	2	4.5↑	1	2.2↑	3	7.8↑	5	4↓
Zhang et al. (2023)	Mixed woody species	China (multiple sites)	25° to 40° 100° to 120°	0-2000	500-2000	6	5.5↓	45	130↑	2.5	5↑	1.2	2.8↑	3.5	8↑	4.5	6↑
Grundmann et al. (2024)	<i>Fagus sylvatica</i> L.	Switzerland (temperate forest)	32° 24' 47° 22'	500-800	1100	5.8	5.6	60	150↑	1.5	3.8↑	0.8	1.9↑	2.5	6↑	4	5.5↑
Grundmann et al. (2024)	<i>Picea abies</i> (L.) H.Karst.	Switzerland (temperate forest)	32° 24' 47° 22'	500-800	1100	5.8	5.2↓	60	180↑	1.5	4.2↑	0.8	2.1↑	2.5	7.5↑	4	5↑

The sign ↑ indicates a significant increase and ↓ indicates a significant decrease (P < 0.05) in stemflow nutrient concentrations, pH, or EC relative to rainfall.

1 The name *Cyclobalanopsis multinervis* W.C.Cheng & T.Hong has been retained as reported in the cited source; it is currently treated as a synonym of *Quercus hypargyrea* (Seemen) C.C.Huang & Y.T.Chang.

2 The name *Cyclobalanopsis oxyodon* (Miq.) Oerst. has been retained as reported in the cited source; it is currently treated as a synonym of *Quercus oxyodon* Miq.

3 The name *Cinnamomum camphora* (L.) J.Presl has been retained as reported in the cited source; it is currently treated as a synonym of *Camphora officinarum* Boerh. ex Fabr.

پژوهش پیش‌رو بخشی از یک پژوهش گسترده‌تر است که پیش از این، ترکیب شیمیایی تاج‌بارش را در همین منطقه و توده‌ها بررسی کرده است (Pourmokhtari et al., 2024). درحالی‌که آن پژوهش بر جنبه عمومی بارش ورودی به کف جنگل (تاج‌بارش) تمرکز داشت، پژوهش پیش‌رو بر ساق‌آب به‌عنوان مسیر متمرکز و محلی انتقال عناصر غذایی (با نقش کلیدی در «جزیره مرطوب» نزدیک تنه درختان) تأکید دارد. این رویکرد مکمل، درک جامعی از تأثیر گونه‌های غیربومی بر چرخه آب‌شناختی و غذایی در ناحیه هیرکانی ارائه می‌دهد.

پژوهش پیش‌رو به‌عنوان بخشی از یک ارزیابی جامع‌تر، به مقایسه شیمی ساق‌آب یک گونه بومی کلیدی (*Carpinus*) و یک گونه غیربومی تندرشد (*Pinus taeda* L.) در بوم‌سازگان هیرکانی می‌پردازد. هدف اصلی، ارائه اولین بینش‌های کمی مستقیم در مورد چگونگی تأثیر احتمالی این جایگزینی بر کیفیت ساق‌آب به‌عنوان جزئی حیاتی، اما کمتر مطالعه‌شده در چرخه مواد مغذی در جنگل است. یافته‌های این پژوهش می‌تواند چارچوب اولیه ارزشمندی برای ارزیابی پیامدهای زیست‌زمین‌شیمیایی پروژه‌های جنگل‌کاری با گونه‌های غیربومی فراهم کند و به‌عنوان مبنایی برای پژوهش‌های آینده و تدوین راهبردهای مدیریت بوم‌سازگان‌محور در جنگل‌های هیرکانی باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه پژوهش

این پژوهش در شهر آستارا واقع در شمال غرب استان گیلان انجام شد. براساس داده‌های ایستگاه هواشناسی آستارا (طول جغرافیایی $51^{\circ} 48'$ ، عرض جغرافیایی $27^{\circ} 38'$ و ارتفاع از سطح دریا ۲۱- متر) در دوره آماری ۳۰ ساله (۱۳۷۱ تا ۱۴۰۰)، اطلاعات اقلیمی منطقه مورد مطالعه در جدول ۲ ارائه شده است (IRIMO, 2023).

برخلاف پیشرفت‌های اخیر در خصوص ارزیابی ترکیب عناصر غذایی ساق‌آب در جنگل‌های جهان مانند بررسی تأثیر تبدیل جنگل‌ها بر جریان عناصر غذایی (Xu et al., 2023) و کمی‌سازی فرایندهای غنی‌سازی در ساق‌آب جنگل‌های معتدل آمیخته (Grundmann et al., 2024)، هنوز خلأهای قابل‌توجهی در پژوهش‌ها وجود دارد. برای مثال، بیشتر پژوهش‌های انجام‌شده در ارتباط با ساق‌آب در جنگل‌های گرمسیری یا نیمه‌خشک متمرکز بوده‌اند (مانند Zhang et al., 2023). پژوهش‌های مشابه در مناطق مرطوب مانند ناحیه هیرکانی ایران محدود است. علاوه‌براین، نقش ساق‌آب در توزیع مواد مغذی در خاک (Teachey et al., 2022) و تأثیر گونه‌های غیربومی بر شیمی بارش (Jochheim et al., 2022) کمتر بررسی شده است. در این راستا، این پژوهش با پر کردن این خلأها، برای اولین بار، ترکیب شیمیایی ساق‌آب را در چنین توده‌هایی در غرب ناحیه هیرکانی مقایسه می‌کند.

بررسی اثر گونه‌های درختی بر چرخه عناصر غذایی در بوم‌سازگان‌های جنگلی، سهم بسزایی در مدیریت بهینه جنگل، انتخاب گونه‌های سازگار در جنگل‌کاری و احیای جنگل دارد (Pourmokhtari et al., 2024). شواهد میدانی، مؤید این نقش حیاتی هستند. به‌طوری‌که تجمع رسوبات آلی و مواد مغذی در زیر تاج درختان حتی در نظام‌های دارکشت‌ورزی (Agroforestry) حاصلخیزی خاک را در مقایسه با عرصه‌های فاقد پوشش درختی به‌طور معنی‌داری افزایش می‌دهد (Mesfin & Haileselassie, 2022). اهمیت این موضوع با در نظرگیری وسعت ۲۹۰ میلیون هکتاری جنگل‌های دست‌کاشت (اعم از بومی و غیربومی) که حدود هفت درصد از مساحت جنگل‌های جهان را تشکیل می‌دهند، دوچندان می‌شود (FAO, 2020). بنابراین انتخاب علمی گونه‌ها برای جنگل‌کاری نه تنها از بروز پیامدهای نامطلوب برای منابع طبیعی جلوگیری می‌کند، بلکه تضمین‌کننده موفقیت پروژه‌های جنگل‌کاری نیز خواهد بود.

جدول ۲- پارامترهای اقلیمی منطقه مورد مطالعه براساس داده‌های ایستگاه هواشناسی آستارا (۱۴۰۰-۱۳۷۱)

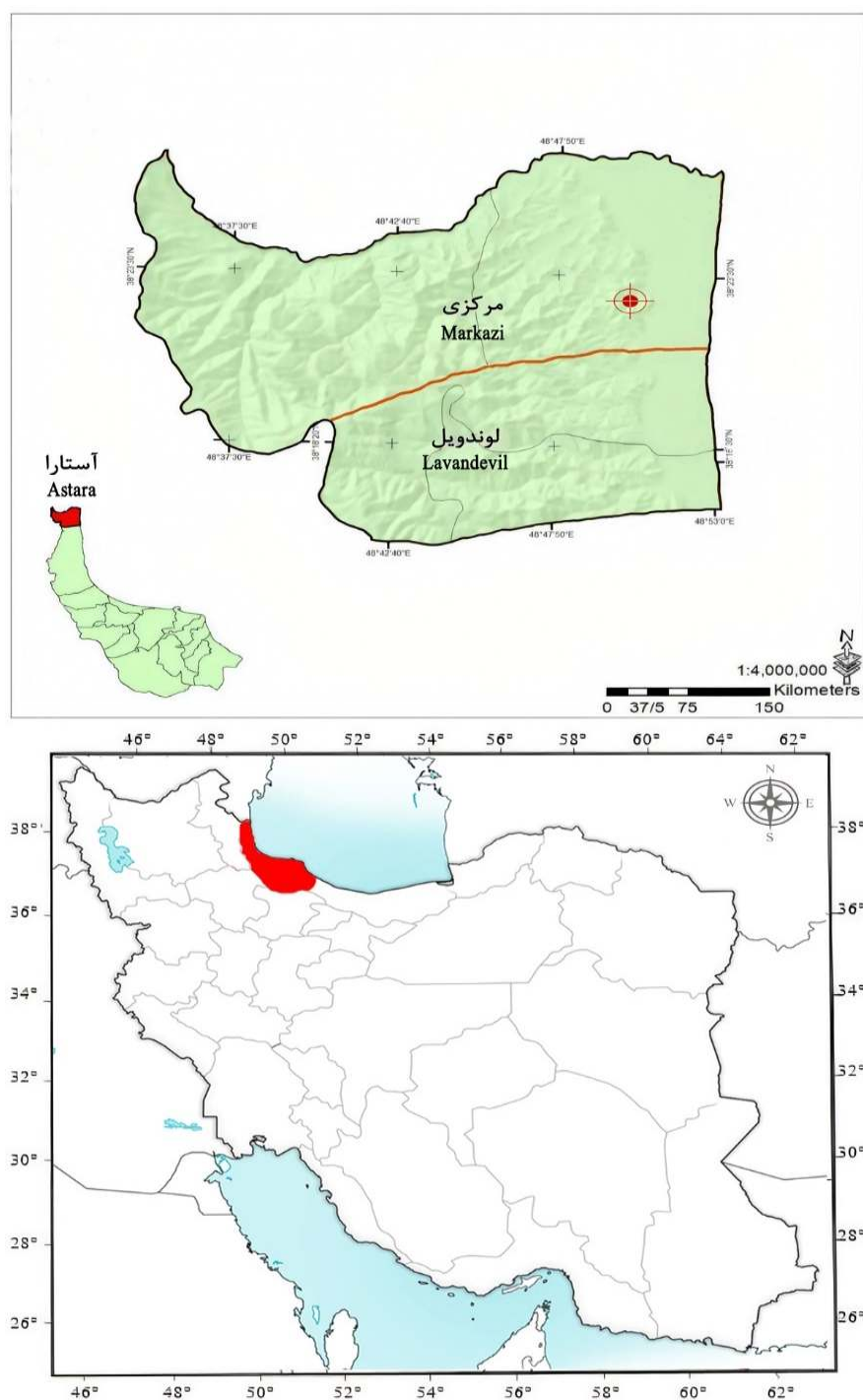
Table 2. Climatic parameters of the study area based on data from Astara Meteorological Station (1992–2021)

Parameter	Mean±SD	Minimum (year)	Maximum (year)	Unit
Annual temperature	15.7±0.6	13.9 (1993)	17.2 (2012)	°C
Annual precipitation	1390±180	872 (2007)	1939 (2000)	mm
Annual relative humidity	79±3	-	-	
Rainy days per year	148±15	145 (1991)	154 (2011)	Day
Snowy days per year	7±5	Zero (Some years)	24 (2011)	Day
Annual snowfall	16±20	Zero (Some years)	95 (2000)	cm
Frost days per year	13±8	Zero (1998)	36 (2007)	Day
Annual evaporation	873±100	-	-	mm
Annual sunshine hours	1871±150	-	-	Hours
Prevailing wind speed	1.5±0.5	-	35 (2000 and 2003)	m/s

۴۸° طول شرقی و ۳۸° ۲۱' عرض شمالی انجام شد (شکل ۲). این پژوهش در توده‌های طبیعی ناهمسال و آمیخته ممرز با گونه‌های توسکای بیلاقی (*Alnus subcordata*) (C.A.Mey.)، افرا پلت (*Acer velutinum* Boiss.) و انجیلی (*Parrotia persica* (DC.) C.A.Mey.) و نیز توده دست‌کاشت همسال و خالص تدا انجام شد (شکل ۳). باتوجه به نزدیکی منطقه مورد مطالعه به دریای خزر و نقش آن به عنوان منبع ورودی سدیم اتمسفری، موقعیت‌یابی جمع‌آوری‌کننده‌ها به گونه‌ای انجام شد که همه نقاط نمونه‌برداری (توده ممرز، توده تدا و جمع‌آوری‌کننده‌های باران) در معرض جریان مشابهی از باد غالب جنوب شرقی قرار گیرند.

در آستارا، بیشترین بارش در فصل پاییز (۴۳ درصد بارش سالانه) و کمترین در بهار (۱۵ درصد) رخ می‌دهد. شهرپور، مهر و آبان‌ماه، پرباران‌ترین ماه‌ها و خرداد، تیر و مرداد، کم‌بارش‌ترین ماه‌ها هستند. کمترین رطوبت و بیشترین ساعت آفتابی در ماه‌های خرداد، تیر و مرداد اندازه‌گیری شده است. جهت باد غالب، جنوب شرقی است. براساس طبقه‌بندی اقلیمی دومارتن اصلاح‌شده، منطقه مورد مطالعه دارای آب‌وهوای بسیار مرطوب معتدل است (IRIMO, 2023). مساحت جنگل‌های آستارا حدود ۳۲ هزار هکتار و ارتفاع مناطق جنگلی بین ۲۰۰ تا ۷۰۰ متر از سطح دریا متغیر است (FRWO, 2019).

پژوهش پیش‌رو در روستای دربند، بخش مرکزی آستارا، در فاصله حدود چهار کیلومتری از دریای خزر با ارتفاع ۱۰ تا ۴۰ متر از سطح آب‌های آزاد و مختصات جغرافیایی ۵۰'



شکل ۲- موقعیت جغرافیایی منطقه پژوهش در شهر آستارا، استان گیلان، ناحیه رویشی هیرکانی

Figure 2. The location of the study site in the Astara city, Gilan province, the Hyrcanian vegetation region, Iran



شکل ۳- توده دست کاشت تدا (تصویر راست) و توده طبیعی ممرز (تصویر چپ)

Figure 3. Man-made stand of *Pinus taeda* L. (right) and natural stand of *Carpinus betulus* L. (left)

توده دست کاشت کاج تدا (که منظم و همسال بود)، درختان با پراکنش یکنواخت و فاصله تقریبی پنج تا ۱۰ متر و در توده طبیعی ممرز (که پراکنده و ناهمسال بود)، درختان براساس توزیع طبیعی توده (شامل موقعیت‌های مرکزی، لبه‌ای و شیب‌دار) انتخاب شدند. معیارهای انتخاب درختان شامل سلامت ظاهری (بدون علائم بیماری یا آسیب)، پوشش خزه روی تنه (برای شبیه سازی شرایط طبیعی در همه درختان)، قطر برابر سینه (DBH) متغیر (۱۸ تا ۳۲ سانتی‌متر برای توده تدا (میانگین ۲۴/۷ سانتی‌متر) و ۳۸ تا ۷۲ سانتی‌متر برای توده ممرز (میانگین ۵۲/۷ سانتی‌متر) بود (جدول ۳). کمینه فاصله بین درختان منتخب ۱۰ تا ۱۵ متر حفظ شد تا از تداخل آب‌شناختی جلوگیری شود. این روش، براساس پژوهش‌های مشابه مانند Germer و Levina (۲۰۱۵) و نیز Chen و همکاران (۲۰۲۲) انتخاب شد تا توان آماری و تعمیم‌پذیری نتایج افزایش یابد.

این پژوهش با در نظر گرفتن محدودیت‌های عملی و زمانی به‌عنوان یک طرح پژوهشی طراحی شد. اگرچه حجم نمونه (شش درخت در هر توده) و دوره مطالعاتی (سه رخداد در یک فصل) ممکن است برای تعمیم‌دهی گسترده کافی نباشد، اما این طرح با اهداف اولیه شناسایی روندها و تفاوت‌های بالقوه بین توده‌ها و همخوانی با حجم نمونه‌های مورد استفاده در پژوهش‌های مشابه طراحی شده است. نمونه‌های باران و ساق‌آب در سه رخداد در ماه‌های تیر، مرداد و شهریور ۱۴۰۱ جمع‌آوری شدند.

روش پژوهش

درختانی که ساق‌آب آن‌ها اندازه‌گیری شد، با روش نمونه‌برداری تصادفی طبقه‌بندی‌شده (Stratified random sampling) انتخاب شدند تا نماینده‌ای از کل توده باشند. در

جدول ۳- مشخصات درختان نمونه‌برداری شده برای جمع‌آوری ساق‌آب در توده‌های ممرز و کاج تدا

Table 3. Characteristics of trees sampled for stemflow collection in *C. betulus* and *P. taeda* stands

Stands	No.	DBH (cm)
<i>Carpinus betulus</i>	1	45
	2	44
	3	38
	4	52
	5	65
	6	72
Mean		52.7±13.2
<i>Pinus taeda</i>	1	23
	2	18
	3	28
	4	32
	5	25
	6	22
Mean		24.7±4.9

ساق‌آب، اقدامات کنترل کیفیت و استانداردسازی به شرح زیر انجام شد:

بازرسی چشمی دقیق همه اتصالات، حلقه‌های مارپیچی و شلنگ‌ها بلافاصله پیش و پس از هر رخداد بارندگی برای شناسایی و رفع احتمالی هرگونه نشتی.

استفاده از درزگیر سیلیکونی با گرید صنعتی و مقاوم در برابر آب برای ایجاد آب‌بندی مطمئن و بادوام بین تجهیزات و پوست درخت.

طراحی و ابعاد جمع‌آوری‌کننده‌های مارپیچی براساس نمونه‌های موفق و استاندارد مورد استفاده در پژوهش‌های معتبر پیشین.

تجهیزات جمع‌آوری ساق‌آب با استانداردهای بین‌المللی (Levia & Frost, 2006; Levia & Germer, 2015) واسنجی (کالیبره) شد. آزمون میدانی برای نشتی با استفاده از آب مقطر انجام شد و عدم نشتی را تأیید کرد (بازده آب‌بندی بیشتر از ۹۸ درصد برآورد شد). حجم آب جمع‌آوری‌شده پس از هر بارش، حدود ۵۰۰ تا ۱۵۰۰ میلی‌لیتر (بسته به شدت بارش) بود.

اجزا و مراحل نصب جمع‌آوری‌کننده ساق‌آب به شرح زیر بود (شکل ۴):

حلقه مارپیچی: بخش اصلی جمع‌آوری‌کننده یک شلنگ است که به‌طور مارپیچ دور تنه درخت پیچیده شده است و جریان آب را از کل محیط تنه جمع‌آوری می‌کند. این حلقه از ارتفاع برابر سینه شروع می‌شود و در نزدیکی یقه درخت پایان می‌یابد.

شلنگ هدایت‌کننده: یک قطعه شلنگ که از پایین حلقه مارپیچی شلنگی یادشده منشعب می‌شود و جریان ساق‌آب را به سمت مخزن هدایت می‌کند. این شلنگ با استفاده از منگنه به تنه درخت وصل می‌شود.

آب‌بندی: فضاهاى خالی بین شلنگ و پوست تنه درخت با درزگیر سیلیکونی به‌طور کامل پر می‌شوند تا از هرگونه نشت یا اختلاط با آب‌های سطحی جلوگیری شود.

اتصال به مخزن: انتهای شلنگ هدایت‌کننده به یک مخزن جمع‌آوری درپوش‌دار و مقاوم به نور خورشید متصل شده است. به‌منظور اطمینان از کارایی و دقت سیستم جمع‌آوری

نصب یکنواخت برای همه درختان و نظارت مستمر، قابلیت اطمینان مقایسه‌های نسبی بین توده‌ها را تضمین می‌کند.

اگرچه یک آزمون کمی رسمی برای سنجش بازیافت (quantitative recovery test) حجم انجام نشد، اما روش



شکل ۴- نصب جمع‌آوری‌کننده‌های مارپیچی بر تنه درختان در قطر برابر سینه

Figure 4. Installation of the spiral type stemflow collection on trees at DBH

است (Attarod *et al.*, 2019; Habashi *et al.*, 2019). اسیدیته نمونه‌ها بلافاصله پس از بارندگی، درون عرصه با استفاده از دستگاه pH متر قلمی (Milwaukee-Martini) اندازه‌گیری شد تا تماس با هوا و زمان‌بندی کمینه شود. دستگاه pH متر، پیش از اندازه‌گیری با استفاده از بافرهای استاندارد (۴ و ۷ با دقت ± 0.2 و کنترل دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد برای جلوگیری از خطای دمایی) واسنجی شد. هدایت الکتریکی با دستگاه EC متر (CMD500-WPA) در آزمایشگاه با دقت ± 5 میکروزیمنس بر سانتی‌متر ($\mu\text{S}/\text{cm}$) اندازه‌گیری شد. غلظت عناصر کلسیم و منیزیم با روش تیتراسیون (EDTA 0.02) و پتاسیم و سدیم با دستگاه فلیم‌فتمتر (Jenway PFP7) برحسب میلی‌گرم بر لیتر (mg/L) با استانداردهای آزمایشگاهی تعیین شد (با منحنی کالیبراسیون $r^2 > 0.98$ براساس پنج نقطه استاندارد)، حد تشخیص (LOD) $0.2 \text{ mg}/\text{L}$ (=) و تکرارپذیری ($\text{CV} < 6\%$).

باران، با استفاده از نه عدد جمع‌آوری‌کننده استاندارد پلی‌اتیلن با قطر دهانه هشت سانتی‌متر و ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر (مساحت سطح هر جمع‌آوری‌کننده: $50/24$ سانتی‌متر مربع) جمع‌آوری شد. این جمع‌آوری‌کننده‌ها در ارتفاع ۱۰ سانتی‌متری از سطح زمین و در فضای کاملاً باز (با فاصله حدود ۲۰ متری از حاشیه توده‌ها) نصب شدند. دهانه آن‌ها با توری پوشانده شد تا از ورود حشرات، لاش‌برگ و آلودگی‌های دیگر جلوگیری شود. نمونه‌ها در ظروف درب‌دار نگهداری و به آزمایشگاه منتقل شدند. پس از هر نمونه‌برداری، جمع‌آوری‌کننده‌ها با آب مقطر شسته و در محل اولیه قرار داده شدند.

به‌منظور اطمینان از قابلیت اتکای داده‌های باران مرجع، یکنواختی جمع‌آوری‌کننده‌ها با محاسبه ضریب تغییرات (CV) برای حجم باران و پارامترهای شیمیایی در هر رخداد بررسی شد. روش‌های اندازه‌گیری و مشخصات فنی تجهیزات به‌کار گرفته شده در این پژوهش، منطبق بر پروتکل‌های میدانی تثبیت‌شده در پژوهش‌های حوزه آب‌شناختی در ناحیه هیرکانی

تحلیل آماری داده‌ها

برای مقایسه میانگین‌ها از مدل خطی اثرات مختلط (Linear mixed-effects model) استفاده شد تا ساختار تکرارشونده داده‌ها (رخدادهای بارندگی) مدل‌سازی شود. رخدادهای بارندگی به عنوان عامل تکراری درون سوژه‌ای (Within-subject factor)، نوع توده (ممرز، تدا و باران) به عنوان عامل ثابت بین سوژه‌ای (Between-subject factor) و درخت یا نمونه به عنوان اثر تصادفی (Random intercept) در نظر گرفته

شدند. معنی‌داری اثرات اصلی و اثرات متقابل با آزمون F بررسی شد. برای مقایسه‌های زوجی از آزمون Tukey's HSD برای کنترل نرخ خطای نوع اول در مقایسه‌های چندگانه استفاده شد. همه تحلیل‌ها در سطح معنی‌داری پنج درصد در نرم‌افزار R (نسخه 4.3.1) انجام شدند.

درصد افزایش یا کاهش پارامترهای شیمیایی ساق‌آب نسبت به باران با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شد:

$$\%Change = [(Stemflow - Rainfall) / Rainfall] \times 100 \quad \text{رابطه (۱)}$$

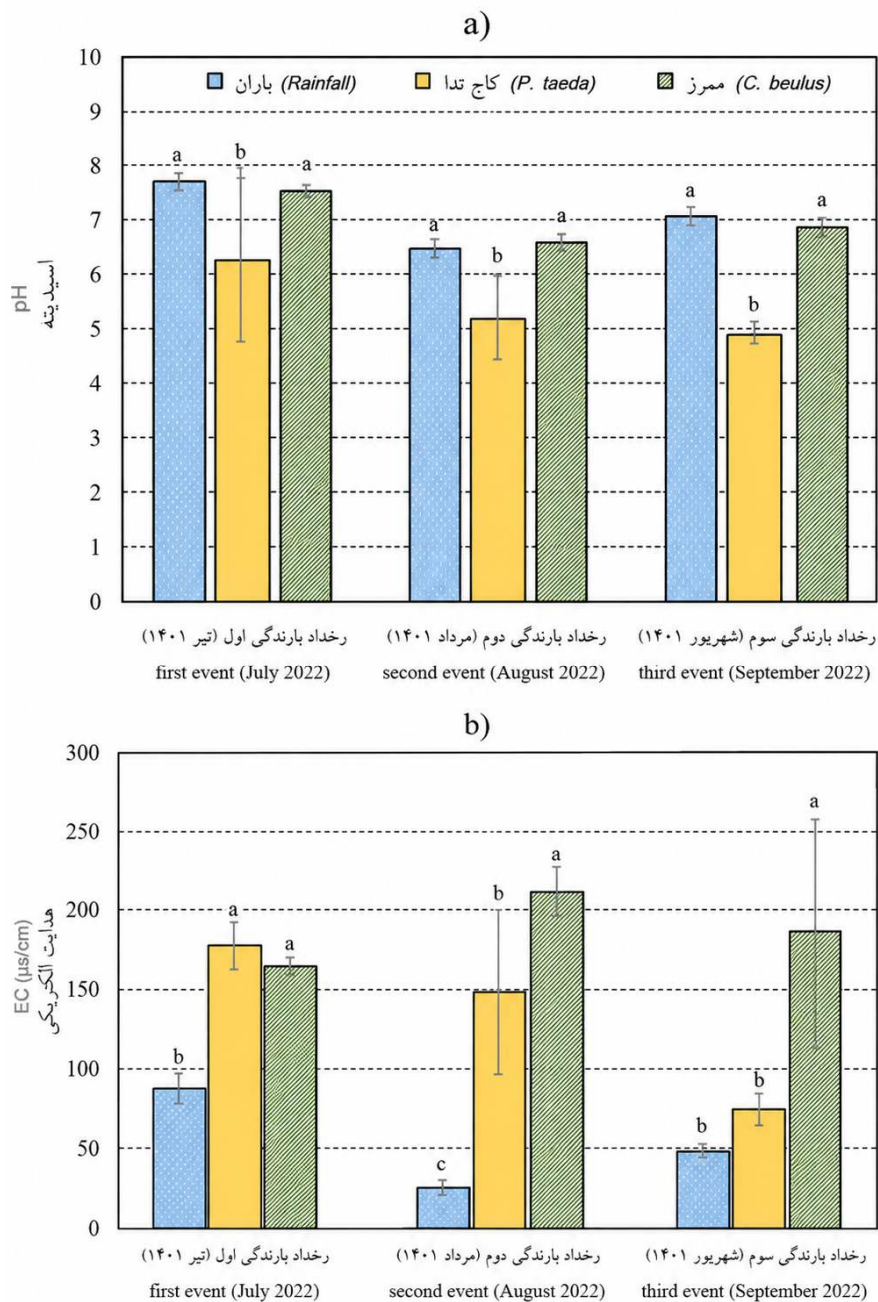
رخدادهای سوم، اسیدیته ساق‌آب تدا، کمترین مقدار (۴/۹) و ساق‌آب ممرز (۶/۹) و باران (۷) بیشترین مقدار به دست آمدند. این اختلاف معنی‌دار بود (شکل ۵a). هدایت الکتریکی ساق‌آب نیز تحت تأثیر معنی‌دار نوع توده قرار داشت (F(2,43.8)=67.45, p<0.001). به طوری که در همه رخدادهای ساق‌آب در هر دو توده ممرز و تدا، هدایت الکتریکی بیشتری نسبت به باران نشان دادند (اختلاف معنی‌دار در دو رخداد اول و دوم). در رخدادهای اول، ساق‌آب ممرز (میانگین ۱۶۵ $\mu\text{S}/\text{cm}$) و تدا (میانگین ۱۷۷ $\mu\text{S}/\text{cm}$) تفاوت معنی‌داری با یکدیگر نداشتند، اما در رخدادهای دوم و سوم، ساق‌آب ممرز به طور معنی‌داری، هدایت الکتریکی بیشتری نسبت به ساق‌آب تدا نشان داد (شکل ۵b).

که در آن Stemflow و Rainfall به ترتیب نشان‌دهنده میانگین غلظت پارامتر در ساق‌آب و باران هستند. خطای معیار (SE) برای این درصدها از طریق روش انتشار خطا (Error propagation) از انحراف معیارهای مربوط به میانگین‌های ساق‌آب و باران محاسبه شد.

نتایج

اسیدیته و هدایت الکتریکی

نتایج مدل اثرات مختلط نشان داد که اسیدیته ساق‌آب، تحت تأثیر معنی‌دار نوع توده قرار دارد (F(2,45.1)=185.32, p<0.001). در رخدادهای اول، اسیدیته ساق‌آب تدا (۶/۳) به طور معنی‌دار کمتر از باران (۷/۷) و ساق‌آب ممرز (۷/۶) بود. این الگو در رخدادهای دوم و سوم نیز تکرار شد. به طوری که در



شکل ۵- مقایسه میانگین اسیدیته (a) و هدایت الکتریکی (b) ساق آب در توده‌های ممز و تدا با باران در سه رخداد بارندگی (تیر، مرداد و شهریورماه ۱۴۰۱) در غرب ناحیه هیرکانی (آستارا)

خطوط بار نشان‌دهنده انحراف معیار و حرف‌های لاتین غیرمشابه بیانگر اختلاف معنی‌دار هستند (مدل اثرات مختلط و مقایسه‌های زوجی، $P < 0.05$).

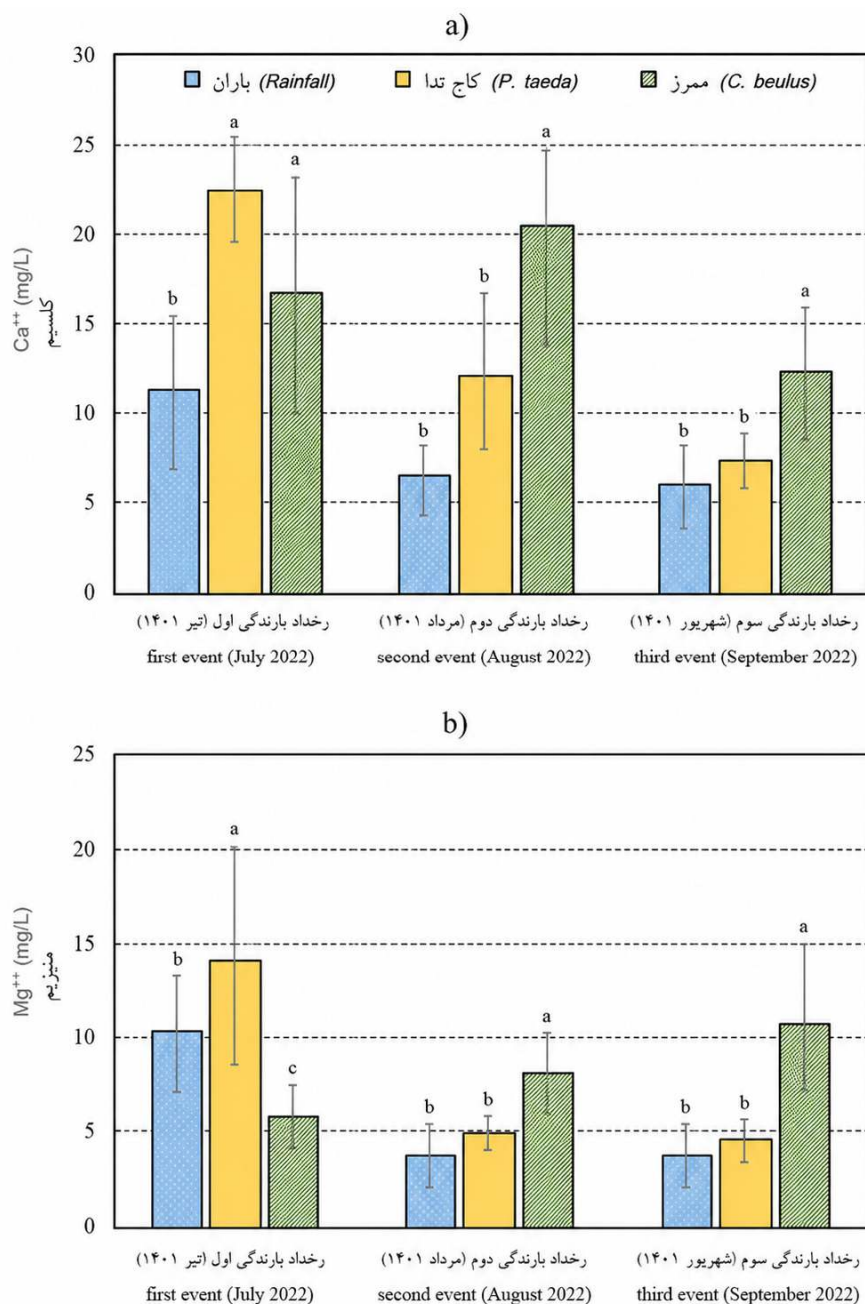
Figure 5. Comparison of the mean pH (a) and EC (b) in stemflow of *C. betulus* and *P. taeda* stands with rainfall measured in three precipitation events (July, August, and September 2022) in the west of Hyrcanian region (Astara)
Error bars show the standard deviation (SD) and dissimilar letters indicate statistically significant differences (Linear Mixed-Effects Model and Tukey's HSD test, $P < 0.05$).

کلسیم و منیزیم

تحلیل مدل اثرات مختلط نشان دهنده تفاوت معنی دار در غلظت کلسیم بین توده ها بود ($F(2,42.3)=28.91, p<0.001$). در رخداد اول، غلظت کلسیم در ساق آب ممرز (میانگین ۱۶/۹ mg/L) و تدا (میانگین ۲۲/۷ mg/L) تفاوت معنی داری با یکدیگر نداشتند، اما هر دو به طور معنی داری، بیشتر از کلسیم باران (میانگین ۱۱/۶ mg/L) بودند. در رخداد دوم، غلظت کلسیم در ساق آب ممرز (میانگین ۲۰/۵ mg/L) به طور معنی داری بیشتر از ساق آب تدا (میانگین ۱۲/۵ mg/L) و نیز باران (میانگین ۶/۷ mg/L) به دست آمد (شکل ۶a). اثر نوع توده نیز بر غلظت منیزیم ساق آب معنی دار شد ($F(2,41.6)=4.57, p=0.016$). چنانچه در رخداد اول، ساق آب تدا (۱۴/۳ mg/L) به طور معنی داری بیشتر از باران (۱۰/۳ mg/L) بود. در رخداد های دوم و سوم فقط غلظت منیزیم در ساق آب توده ممرز، تفاوت معنی داری با باران نشان داد (شکل ۶b).

پتاسیم و سدیم

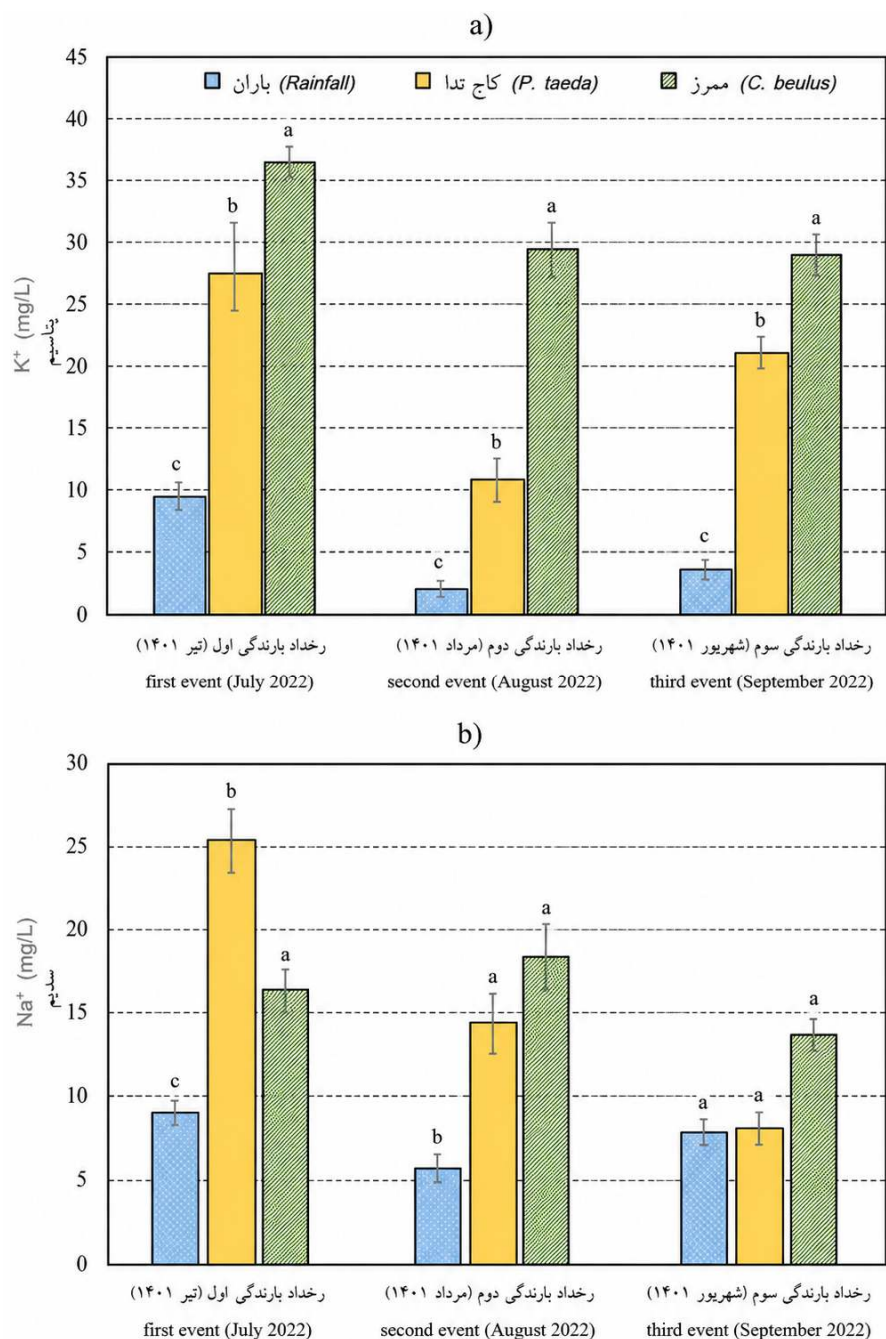
پتاسیم موجود در ساق آب، بیشترین تفاوت را بین توده ها نشان داد ($F(2,44.2)=142.67, p<0.001$). در همه رخدادها، ساق آب ممرز، بیشترین غلظت پتاسیم را داشت (رخداد اول: ۳۶/۴ mg/L، رخداد دوم: ۲۹/۴ mg/L و رخداد سوم: ۲۸/۸ mg/L). پتاسیم ساق آب در توده تدا نیز در همه رخدادها به طور معنی داری بیشتر از پتاسیم باران اما به طور معنی داری کمتر از پتاسیم ساق آب ممرز به دست آمد (شکل ۷a). غلظت سدیم ساق آب نیز تحت تأثیر معنی دار نوع توده قرار گرفت ($F(2,43.1)=35.82, p<0.001$)، به طوری که در رخداد اول، سدیم موجود در ساق آب ممرز (۱۶/۶ mg/L) و تدا (۲۵/۸ mg/L) به طور معنی داری بیشتر از باران (۹/۳ mg/L) بودند. در رخداد دوم، سدیم موجود در ساق آب ممرز (۱۸/۷ mg/L) و تدا (۱۴/۶ mg/L) همچنان بیشتر از باران (۵/۶ mg/L) اندازه گیری شد (شکل ۷b).



شکل ۶- مقایسه میانگین کلسیم (a) و منیزیم (b) ساقاب در توده‌های ممرز و تدا با باران در سه رخداد بارندگی (تیر، مرداد و شهریور ۱۴۰۱) در غرب ناحیه هیرکانی (آستارا)

خطوط بار نشان‌دهنده انحراف معیار و حرف‌های لاتین غیرمشابه بیانگر اختلاف معنی‌دار هستند (مدل اثرات مختلط و مقایسه‌های زوجی، $P < 0.05$).

Figure 6. Comparison of the mean Ca^{++} (a) and Mg^{++} (b) in stemflow of *C. betulus* and *P. taeda* stands with rainfall measured in three precipitation events (July, August, and September 2022) in the west of Hyrcanian region (Astara) Error bars show the standard deviation (SD) and dissimilar letters indicate statistically significant differences (Linear Mixed-Effects Model and Tukey's HSD test, $P < 0.05$).



شکل ۷- مقایسه میانگین پتاسیم (a) و سدیم (b) ساقاب توده‌های ممرز و تدا با باران در سه رخداد بارندگی (تیر، مرداد و شهریور ۱۴۰۱) در غرب ناحیه هیرکانی (آستارا)

خطوط بار نشان‌دهنده انحراف معیار و حرف‌های لاتین غیرمشابه بیانگر اختلاف معنی‌دار هستند (مدل اثرات مختلط و مقایسه‌های زوجی، $P < 0.05$).

Figure 7. Comparison of the mean K^+ (a) and Na^+ (b) in stemflow of *C. betulus* and *P. taeda* stands with rainfall measured in three precipitation events (July, August, and September 2022) in the west of Hyrcanian region (Astara) Error bars show the standard deviation (SD) and dissimilar letters indicate statistically significant differences (Linear Mixed-Effects Model and Tukey's HSD test, $P < 0.05$).

نتایج آزمون کولموگروف-سمیرنوف (KS) نشان داد که داده‌های مربوط به اسیدیتته، هدایت الکتریکی، کلسیم، منیزیم، پتاسیم و سدیم در همه توده‌ها، توزیع نرمال دارند ($P=0.05$ >value). میانگین ضریب تغییرات (CV) برای حجم باران، کمتر از ۱۰ درصد و برای پارامترهای شیمیایی، کمتر از ۱۵ درصد به دست آمد که نشان‌دهنده همگنی قابل قبول و قابلیت اطمینان داده‌ها است.

متوسط هدایت الکتریکی ساق آب در هر دو توده ممرز و تدا به طور معنی‌داری نسبت به باران افزایش داشت (جدول ۴). در توده ممرز، این میزان افزایش حدود 268 ± 47 درصد (از ۵۰ به $183 \mu\text{S/cm}$) و در توده تدا، 167 ± 36 درصد (از ۵۰ به $132 \mu\text{S/cm}$) بود (جدول ۴).

متوسط غلظت کلسیم در ساق آب در هر دو توده طبیعی ممرز (140 ± 23 درصد) و دست‌کاشت تدا (88 ± 19 درصد) به طور معنی‌داری افزایش یافت (جدول ۴). به طور میانگین، غلظت کلسیم در باران، در ساق آب ممرز و در ساق آب تدا

به ترتیب ۷/۴، ۱۷/۸ و ۱۳/۹ (mg/L) اندازه‌گیری شد (جدول ۴). متوسط غلظت منیزیم در ساق آب در توده طبیعی ممرز نسبت به باران، 26 ± 13 درصد (از ۷/۲ به ۹/۱ mg/L) افزایش یافت (جدول ۴).

در هر سه رخداد، غلظت پتاسیم موجود در ساق آب در هر دو توده ممرز و تدا، تغییرهای معنی‌داری نشان داد (شکل ۸)، به طوری که در مجموع، غلظت پتاسیم ساق آب نسبت به باران ورودی در توده ممرز 470 ± 42 درصد (از ۵/۴ به ۳۰/۸ mg/L) و در توده تدا حدود 267 ± 30 درصد (از ۵/۴ به ۱۹/۸ mg/L) افزایش یافت (جدول ۴). متوسط غلظت سدیم در ساق آب توده‌های طبیعی ممرز و دست‌کاشت تدا نیز نسبت به باران به طور معنی‌داری افزایش نشان داد. به طوری که افزایش آن در توده ممرز حدود 121 ± 15 درصد (از ۷/۶ به ۱۶/۸ mg/L) و در توده تدا برابر با 116 ± 14 درصد (از ۷/۶ به ۱۶/۴ mg/L) بود (جدول ۴).

جدول ۴- میانگین اسیدیتته، هدایت الکتریکی و عناصر غذایی ساق آب در توده‌های طبیعی ممرز و دست‌کاشت تدا در مقایسه با باران با استفاده از مدل اثرات مختلط

Table 4. Means of pH, EC and nutrient elements in stemflow of a natural stand of *Carpinus betulus* and a man-made *Pinus taeda* plantation compared with rainfall using Linear Mixed-Effects Model

Parameter	Rainfall (Rf)	<i>C. betulus</i> (Cb)	<i>P. taeda</i> (Pt)	F-value	df	p-value	Tukey's HSD
pH	7.1 ± 0.2	6.9 ± 0.2	$5.4 \pm 0.1^{**}\downarrow$	F= 185.32	2, 45.1	<0.001	Pt < Rf = Cb
EC ($\mu\text{S/cm}$)	49.8 ± 25.1	$183.2 \pm 62.3^{**}\uparrow$	$132.8 \pm 59.4^{**}\uparrow$	F= 67.45	2, 43.8	<0.001	Cb > Pt > Rf
Ca ⁺⁺ (mg/L)	7.4 ± 3.8	$17.8 \pm 5.9^{**}\uparrow$	$13.9 \pm 7.5^{**}\uparrow$	F= 28.91	2, 42.3	<0.001	Cb = Pt > Rf
Mg ⁺⁺ (mg/L)	7.2 ± 4.8	$9.1 \pm 3.8^{**}\uparrow$	8.1 ± 6.2	F= 4.57	2, 41.6	0.016	Cb > Rf
K ⁺ (mg/L)	5.4 ± 3.2	$30.8 \pm 5.2^{**}\uparrow$	$19.8 \pm 7.1^{**}\uparrow$	F= 142.67	2, 44.2	<0.001	Cb > Pt > Rf
Na ⁺ (mg/L)	7.6 ± 1.9	$16.8 \pm 4.3^{**}\uparrow$	$16.4 \pm 6.9^{**}\uparrow$	F= 35.82	2, 43.1	<0.001	Cb = Pt > Rf

The red values indicate significant difference with those contained in rainfall. The sign $\uparrow$ indicates a significant increase and $\downarrow$ indicates a significant decrease ($P < 0.05$) in nutrient elements, pH, and EC of stemflow compared with rainfall.

غذایی به همراه اسیدیتته و هدایت الکتریکی) سنجیده شد. در توده طبیعی ممرز، ۷۵ تا ۸۰ درصد از پارامترهای ساق آب (شامل

در این پژوهش برای هر توده جنگلی، ۱۸ نمونه ساق آب (سه رخداد بارندگی و شش پارامتر شیمیایی یعنی چهار عنصر

(شکل ۸). مقایسه بین‌توده‌ای نیز حاکی از آن است که حدود ۸۰ درصد از پارامترهای ساق‌آب در توده تدا، تغییرات معنی‌داری را تجربه کردند (شکل ۹).

عناصر غذایی، اسیدیته و هدایت الکتریکی) تغییرات معنی‌داری نسبت به باران نشان دادند (شکل ۸)، درحالی‌که این میزان در توده دست‌کاشت تدا ۶۵ تا ۷۰ درصد به‌دست آمد

	First event July 2022						Second event August 2022						Third event September 2022					
<i>C. betulus</i>	pH	EC	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	pH	EC	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	pH	EC	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺
<i>P. taeda</i>	pH	EC	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	pH	EC	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	pH	EC	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺

شکل ۸- خلاصه گرافیکی تغییرات معنی‌دار در پارامترهای شیمیایی ساق‌آب در هر توده نسبت به باران در سه رخداد بارندگی طی تابستان

۱۴۰۱

خانه‌های قرمز و زرد به ترتیب نشان‌دهنده تغییرات معنی‌دار و غیرمعنی‌دار ساق‌آب در مقایسه با باران هستند.

Figure 8. A graphical summary of significant changes in the chemical parameters of each stand's stemflow compared to rainfall during three precipitation events in the summer of 2022
Red and yellow cells denote significant and non-significant changes in stemflow compared to rainfall, respectively.

	First event July 2022						Second event August 2022						Third event September 2022					
Stemflow	pH	EC	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	pH	EC	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	pH	EC	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺

شکل ۹- خلاصه گرافیکی تغییرات معنی‌دار در پارامترهای شیمیایی ساق‌آب هر توده نسبت به یکدیگر در سه رخداد بارندگی طی تابستان

۱۴۰۱

خانه‌های قرمز و زرد به ترتیب نشان‌دهنده تغییرات معنی‌دار و غیرمعنی‌دار ساق‌آب دو توده در مقایسه با یکدیگر هستند.

Figure 9. Graphical summary of significant differences in stemflow chemical parameters between the stands across three rainfall events in the summer of 2022
Red and yellow cells denote significant and non-significant changes in stemflow of the two stands compared to each other, respectively.

بحث

از مدل اثرات مختلط در مقایسه با روش‌های متداول‌تری مانند ANOVA ممکن است در سطح معنی‌داری برخی نتایج، تفاوت ایجاد کرده باشد، اما این امر بر الگوی کلی تغییرات، تأثیر

در این پژوهش، الگوی کلی تغییرات عناصر غذایی در ساق‌آب با پژوهش‌های پیشین همخوانی داشت. اگرچه استفاده

نزدیکی منطقه مطالعه به دریای خزر و ورود بیشتر آن از طریق رسوبات جوی نسبت داد (Levia & Frost, 2006).

در تفسیر نتایج پژوهش پیش رو لازم است به محدودیت‌های مهم اشاره شود. توده طبیعی ممرز دارای ساختاری ناهمسال، آمیخته و پیچیده بود، در حالی که توده دست‌کاشت تدا، ساختاری همسال، خالص و ساده‌تر داشت. علاوه‌براین، تفاوت‌هایی در میانگین قطر، تراکم تاج‌پوشش، زبری پوست و سن درختان بین دو توده مشاهده می‌شود، بنابراین تفاوت‌های اندازه‌گیری شده در شیمی ساق‌آب را نمی‌توان فقط به اثر گونه نسبت داد. بلکه این تفاوت‌ها، بازتابی از تمایز کلی بین یک بوم‌سازگان طبیعی پیچیده و یک سیستم جنگل‌کاری ساده‌شده است. همچنین، وجود پوشش طبیعی خزه بر روی تنه درختان نمونه نیز می‌تواند به‌عنوان یک فیلتر زیستی اضافی، نقشی در غلظت نهایی عناصر ساق‌آب ایفا کند. از آنجایی که این پوشش، بخشی از شرایط طبیعی توده‌های جنگلی در ناحیه هیرکانی محسوب می‌شود، در این پژوهش کنترل یا حذف نشد و داده‌های گزارش‌شده، ویژگی‌های ساق‌آب را در شرایط بوم‌شناختی واقعی منعکس می‌کنند.

یافته‌های این پژوهش با نتایج پژوهش پیشین ما روی تاج‌بارش در همین توده‌ها همخوانی دارد (Pourmokhtari *et al.*, 2024). در آن پژوهش نیز افزایش غلظت عناصر غذایی در تاج‌بارش توده ممرز نسبت به تدا مشاهده شد. با این حال، ساق‌آب در توده تدا اسیدی‌تر و با غلظت کمتر عناصر بود که نشان‌دهنده تفاوت مکانی در توزیع مواد مغذی است. این مقایسه مکمل تأکید می‌کند که جایگزینی گونه‌های غیربومی می‌تواند چرخه زیست‌زمین‌شیمیایی را در سطوح مختلف مختل کند.

باتوجه به نمونه‌برداری محدود فصلی، یافته‌های این پژوهش باید به‌عنوان شواهد اولیه در نظر گرفته شوند. برای دستیابی به نتایج قطعی و تعمیم‌پذیر، انجام پژوهش‌های بلندمدت با حجم نمونه بزرگ‌تر در فصل‌های مختلف سال ضروری است. بر این اساس، پیشنهاد می‌شود:

چندانی نداشت. کاهش معنی‌دار اسیدیت ساق‌آب در توده تدا در مقایسه با ممرز و باران، با الگوی گزارش‌شده برای بسیاری از گونه‌های سوزنی‌برگ همخوانی داشت (Silva & Rodriguez, 2001; Attarod *et al.*, 2019; Jana *et al.*, 2021; Chen *et al.*, 2022; Xu *et al.*, 2023; Grundmann *et al.*, 2024). سازوکار دقیق این اسیدی شدن در محدوده پژوهش پیش‌رو بررسی نشد، اما در ادبیات موضوع، این پدیده به‌طور معمول به عواملی همچون نشت ترکیبات اسیدی ضعیف (مانند اسیدهای آلی) از بافت‌های گیاهی، جذب ترجیحی کاتیون‌های بازی توسط تاج‌پوشش و پوست یا ویژگی‌های شیمیایی ذاتی پوست درخت نسبت داده می‌شود (HouBao *et al.*, 1999).

افزایش هدایت الکتریکی و غلظت عناصر غذایی در ساق‌آب هر دو توده نسبت به باران با الگوی عمومی گزارش‌شده در منابع موجود همسو است (جدول ۱). افزایش هدایت الکتریکی اغلب ناشی از آزادسازی یون‌ها و عناصر معدنی از سطح اندام‌های گیاهی است که نقش کلیدی در انتقال مواد مغذی به خاک ایفا می‌کند (Levia & Frost, 2006). به‌طور مشابه، افزایش غلظت کاتیون‌های بازی مانند کلسیم و منیزیم در ساق‌آب، همان‌طور که در پژوهش پیش‌رو مشاهده شد، پدیده‌ای رایج است و سهم مهمی در تغذیه خاک و چرخه مواد مغذی جنگل دارد (Ikawa, 2007; Chen *et al.*, 2022; Xu *et al.*, 2023; Grundmann *et al.*, 2024). با این حال، نوع گونه، ساختار پوشش گیاهی و ویژگی‌های فیزیولوژیک درختان چنانچه در مقایسه بین ممرز و تدا مشاهده شد، می‌تواند بر میزان این افزایش تأثیر بگذارد (Ikawa, 2007; Xu *et al.*, 2023). به‌طور خاص، تفاوت معنی‌دار در افزایش غلظت پتاسیم بین دو توده به‌احتمال زیاد به ویژگی‌های مورفولوژیک و آناتومیک ممرز مرتبط است. در این گونه، بافت چوبی می‌تواند به‌عنوان یک منبع مهم عمل کند و این عنصر از طریق فرایندهای آب‌شویی به سطح ساقه‌ها منتقل شود (Attarod *et al.*, 2019; Chen *et al.*, 2022; Xu *et al.*, 2023). درنهایت، افزایش قابل‌توجه سدیم را اغلب می‌توان به

تحلیل‌های شیمیایی تکمیلی شامل اندازه‌گیری غلظت اسیدهای آلی، آنیون‌های معدنی و آلکالیت در کنار پارامترهای بررسی شده انجام شود.

این پژوهش در فصل‌های مختلف سال و در بلندمدت تکرار شود.

پژوهش‌های یکپارچه‌ای که هم‌زمان شیمی، حجم ساق آب و تاج‌بارش را اندازه‌گیری می‌کنند، انجام شود.

References

- Abbasian, P., Attarod, P., Sadeghi, S.M.M., Van Stan, J.T. and Hojjati, S.M., 2015. Throughfall nutrients in a degraded indigenous *Fagus orientalis* forest and a *Picea abies* plantation in the north of Iran. *Forest Systems*, 24(3): e035. <https://doi.org/10.5424/fs/2015243-06764>
- Ahmadi, M.T., Attarod, P., Marvi Mohadjer, M.R., Rahmani, R. and Fathi, J., 2009. Canopy interception loss in a pure oriental beech (*Fagus orientalis* Lipsky) stand during the summer season. *Iranian Journal of Forest*, 1(2): 175-185 (In Persian with English summary).
- Attarod, P., Abbasian, P., Grant Pypker, T., Ahmadi, M.T., Zahedi-Amiri, G., Soofi-Mariv, H. and Bayramzadeh, V., 2019. Replacing an oriental beech forest with a spruce plantation impacts nutrient concentrations in throughfall, stemflow, and O layer. *Forest Systems*, 28(2): e010. <https://doi.org/10.5424/fs/2019282-14782>
- Brasell, H.M., Unwin, G.L. and Stocker, G.C., 1980. The quantity, temporal distribution and mineral-element content of litterfall in two forest types at two sites in tropical Australia. *Journal of Ecology*, 68(1): 123-139. <https://doi.org/10.2307/2259247>
- Chen, Z., Wang, Y., Chen, R., Ni, X. and Cao, J., 2022. Effects of forest type on nutrient fluxes in throughfall, stemflow, and litter leachate within acid-polluted locations in Southwest China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(5): 2810. <https://doi.org/10.3390/ijerph19052810>
- Chiwa, M., Kim, D.H. and Sakugawa, H., 2003. Rainfall, stemflow, and throughfall chemistry at urban- and mountain-facing sites at Mt. Gokurakuji, Hiroshima, western Japan. *Water, Air, and Soil Pollution*, 146: 93-109. <https://doi.org/10.1023/A:1023946603217>
- Da Silva, L.P., Heleno, R.H., Costa, J.M., Valente, M., Mata, V.A., Gonçalves, S.C., Da Silva, A.A., Alves, J. and Ramos, J.A., 2019. Natural woodlands hold more diverse, abundant, and unique biota than novel anthropogenic forests: a multi-group assessment. *European Journal of Forest Research*, 138: 461-472. <https://doi.org/10.1007/s10342-019-01183-5>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2020. Global Forest Resources Assessment 2020: Main report. Rome, 184p. <https://doi.org/10.4060/ca9825en>
- Forests, Range and Watershed Management Organization (FRWO), 2019. Comprehensive report on Caspian and Talish forests in Iran. Tehran, 13 p. (In Persian)
- Germer, S., Werther, L. and Elsenbeer, H., 2010. Have we underestimated stemflow? Lessons from an open tropical rainforest. *Journal of Hydrology*, 395(3-4): 169-179. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.10.022>
- Grundmann, M.H., Molnar, P. and Floriancie, M.G., 2024. Quantification of enrichment processes in throughfall and stemflow in a mixed temperate forest. *Hydrological Processes*, 38(7): e15224. <https://doi.org/10.1002/hyp.15224>
- Guo, L., Mount, G.J., Hudson, S., Lin, H. and Levia, D., 2020. Pairing geophysical techniques improves understanding of the near-surface Critical Zone: Visualization of preferential routing of stemflow along coarse roots. *Geoderma*, 357: 113953. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.113953>
- Habashi, H., Moslehi, M., Shabani, E., Pypker, T. and Rahmani, R., 2019. Chemical content and seasonal variation of throughfall and litterflow under individual trees in the Hyrcanian forests of Iran. *Journal of Sustainable Forestry*, 38(2): 183-197. <https://doi.org/10.1080/10549811.2018.1554496>
- HouBao, F., Wei, H., Zhuang, M. and Kosuke, W., 1999. Acidity and chemistry of bulk precipitation, throughfall and stemflow in a Chinese fir plantation in Fujian, China. *Forest Ecology and Management*, 122(3): 243-248. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(99\)00011-0](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(99)00011-0)
- Ikawa, R., 2007. Literature review of stemflow generation and chemical characteristics in Japanese forests. *Journal of Japanese Association of Hydrological Sciences*,

- 37(4): 187-200. <https://doi.org/10.4145/jahs.37.187>
- Iranian Meteorological Organization (IRIMO), 2023. Climatic report of Astara Synoptic Station (WMO Code: 40709), Statistical period: 1992-2021. <http://www.irimo.ir>
 - Jana, P., Dasgupta, S. and Todaria, N.P., 2021. Throughfall and stemflow nutrient flux in deodar and oak forests, Garhwal Himalaya, India. *Water Supply*, 21(4): 1649-1656. <https://doi.org/10.2166/ws.2021.009>
 - Jochheim, H., Lüttschwager, D. and Riek, W., 2022. Stem distance as an explanatory variable for the spatial distribution and chemical conditions of stand precipitation and soil solution under beech (*Fagus sylvatica* L.) trees. *Journal of Hydrology*, 608: 127629. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127629>
 - Levia, D.F. and Frost, E.E., 2006. Variability of throughfall volume and solute inputs in wooded ecosystems. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 30(5): 605-632. <https://doi.org/10.1177/0309133306071145>
 - Levia, D.F. and Germer, S., 2015. A review of stemflow generation dynamics and stemflow-environment interactions in forests and shrublands. *Reviews of Geophysics*, 53(3): 673-714. <https://doi.org/10.1002/2015RG000479>
 - Levia, D.F., Nanko, K., Amasaki, H., Giambelluca, T.W., Hotta, N., Iida, S., Mudd, R.G., Nullet, M.A., Sakai, N., Shinohara, Y., Sun, X., Suzuki, M., Tanaka, N., Tantasirin, C. and Yamada, K., 2019. Throughfall partitioning by trees. *Hydrological Processes*, 33(12): 1698-1708. <https://doi.org/10.1002/hyp.13432>
 - Li, X.Y., Yang, Z.P., Li, Y.T. and Lin, H., 2009. Connecting ecohydrology and hydrogeology in desert shrubs: stemflow as a source of preferential flow in soils. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13(7): 1133-1144. <https://doi.org/10.5194/hess-13-1133-2009>
 - Llorens, P. and Domingo, F., 2007. Rainfall partitioning by vegetation under Mediterranean conditions. A review of studies in Europe. *Journal of Hydrology*, 335(1-2): 37-54. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.10.032>
 - Mesfin, S. and Haileselassie, H., 2022. Evaluation of soil physico-chemical properties as affected by canopies of scattered agroforestry trees on croplands. *South African Journal of Plant and Soil*, 39(2): 153-162. <https://doi.org/10.1080/02571862.2022.2056644>
 - Moghadamshoar, Sh., Oladi, R., Pourtahmasi, K. and Emaminasab, M., 2024. The effect of climatic factors on the radial growth and vascular characteristics of *Paulownia fortunei* (Seem.) Hemsl. in the Golestan Province, Iran. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 32(3): 232-248 (In Persian with English summary). <https://doi.org/10.22092/ijfpr.2024.365184.2151>
 - Mosayeb Neghad, I., Rostami Shahraji, T., Kahneh, E. and Porbabaii, H., 2007. Evaluation of native broadleaved forest plantations in east of Guilan province. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 15(4): 311-319 (In Persian with English summary).
 - Nsien, I.B., Offiong, E.E., Olowoyo, F.B., Ogar, B.I. and Eric, E.E., 2021. Nutrient cycling through precipitation pathways: Rainfall, stemflow and throughfall in *Diospyros crassiflora* (Hiern) plantation in Umuahia, Abia State-Nigeria. *Ethiopian Journal of Environmental Studies and Management*, 14(6): 787-798. <https://ejesm.org/doi/v14i6.10>
 - Oka, A., Takahashi, J., Endoh, Y. and Seino, T., 2021. Bark effects on stemflow chemistry in a Japanese temperate forest I: The role of bark surface morphology. *Frontiers in Forests and Global Change*, 4: 654375. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2021.654375>
 - Parker, G.G., 1983. Throughfall and stemflow in the forest nutrient cycle. *Advances in Ecological Research*, 13: 57-133. [https://doi.org/10.1016/S0065-2504\(08\)60108-7](https://doi.org/10.1016/S0065-2504(08)60108-7)
 - Pourmokhtari, P., Attarod, P., Etemad, V. and Safarkar, T., 2024. Does replacement of a *Pinus taeda* L. man-made plantation with a *Carpinus betulus* L. natural stand alter the throughfall nutrient inputs and pH and EC values? *Iranian Journal of Forest*, 16(2): 213-225 (In Persian with English summary). <https://doi.org/10.22034/ijf.2024.392525.1924>
 - Silva, I.C. and Rodriguez, H.G., 2001. Interception loss, throughfall and stemflow chemistry in pine and oak forests in northeastern Mexico. *Tree Physiology*, 21(12-13): 1009-1013. <https://doi.org/10.1093/treephys/21.12-13.1009>
 - Su, L., Zhao, C., Xu, W. and 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>
 - Teachey, M.E., Ottesen, E.A., Pound, P. and Van Stan, J.T., 2022. Under the canopy: Disentangling the role of stemflow in shaping spatial patterns of soil microbial community structure underneath trees. *Environmental Microbiology*, 24(9): 4001-4012. <https://doi.org/10.1111/1462-2920.15970>

- Tonello, K.C., Rosa, A.G., Pereira, L.C., Matus, G.N., Guandique, M.E.G. and Navarrete, A.A., 2021. Rainfall partitioning in the Cerrado and its influence on net rainfall nutrient fluxes. *Agricultural and Forest Meteorology*, 303: 108372. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108372>
- Wang, D. and Wang, L., 2020. Rainfall partitioning and its effects on regional water balances: Evidence from the conversion of traditional cropland to apple orchards in a semi-humid region. *Hydrological Processes*, 34(24): 4628-4639. <https://doi.org/10.1002/hyp.13891>
- Xu, Q., Wu, F., Peng, Y., Hedenec, P., Ni, X., Tan, S., Huang, Y. and 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>
- Zhang, Y.F., Wang, X.P., Hu, R. and Pan, Y.X., 2017. Stemflow volume per unit rainfall as a good variable to determine the relationship between stemflow amount and morphological metrics of shrubs. *Journal of Arid Environments*, 141: 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2017.02.002>
- Zhang, Y., Wang, X.P., Pan, Y., Hu, R. and Chen, N., 2021. Global quantitative synthesis of effects of biotic and abiotic factors on stemflow production in woody ecosystems. *Global Ecology and Biogeography*, 30(8): 1713-1723. <https://doi.org/10.1111/geb.13322>
- Zhang, Y., Yuan, C., Chen, N. and Levia, D.F., 2023. Rainfall partitioning by vegetation in China: A quantitative synthesis. *Journal of Hydrology*, 617(Part A): 128946. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128946>