

DOI: <https://doi.org/10.22034/jmas.2026.558437.1254>

مقایسه انتشار ترکیبات آلی فرار بیوژنیک (BVOCs) در استان‌های شمالی ایران و استان یزد با استفاده از مدل MEGAN

یگانه یوسف پور^۱، خسرو اشرفی^{۲*}، علیرضا پرداختی^۳، امیر هوشنگ احسانی^۴

^۱ دانشجوی دکتری، گروه مهندسی محیط‌زیست، پردیس بین‌المللی کیش، دانشگاه تهران، کیش، ایران

^۲ استاد، گروه مهندسی محیط‌زیست، دانشکده محیط‌زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۳ دانشیار، گروه مهندسی محیط‌زیست، دانشکده محیط‌زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۴ دانشیار، گروه مهندسی طراحی محیط، دانشکده محیط‌زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۲۱

چکیده

ترکیبات آلی فرار بیوژنیک (BVOCs) از جمله آلاینده‌های طبیعی هستند که در واکنش‌های فتوشیمیایی جو نقش بسزایی داشته و به تشکیل آلاینده‌هایی مانند ازن و ذرات معلق ثانویه کمک می‌کنند. بررسی میزان انتشار این ترکیبات در شرایط اقلیمی مختلف، به‌ویژه در نواحی با پوشش گیاهی متنوع، اهمیت زیادی در درک فرایندهای مؤثر بر کیفیت هوا دارد. این پژوهش با هدف مقایسه میزان انتشار ایزوپرن و مونوترپن به‌منزله مهم‌ترین BVOCها، در دو منطقه اقلیمی متفاوت از کشور شامل شمال مرطوب و یزد خشک، انجام شده است. برای این منظور از مدل MEGAN استفاده شد و داده‌های ورودی شامل شاخص سطح برگ (LAI)، دمای هوا، تابش خورشید و نوع پوشش گیاهی در فصل تابستان به کار گرفته شد. نتایج نشان داد که در شمال ایران، به دلیل تراکم بالای پوشش گیاهی، فراوانی گونه‌های پهن‌برگ و اقلیم معتدل‌تر، نرخ بیشینه انتشار ایزوپرن و مونوترپن به‌طور میانگین ۵ تا ۲۱ برابر بیشتر از استان یزد بوده است. این نتایج نشان‌دهنده نقش مستقیم عوامل هواشناسی و ساختار پوشش گیاهی در شدت انتشار BVOCها و اهمیت آن در مدیریت زیست‌محیطی فضای سبز شهری است.

کلمات کلیدی: پوشش گیاهی، BVOCs، شاخص سطح برگ (LAI)، انتشار ایزوپرن، کیفیت هوا

قلبی عروقی تحت تأثیر قرارگیری بیش از حد در معرض ازن است (سازمان جهانی بهداشت^۷، ۲۰۰۶).

ترکیبات آلی فرار بیوژنیک از منابع مختلف تولید می‌شوند؛ اما بیشترین انتشار آن‌ها در جهان توسط شاخ‌وبرگ است (گونتر و همکاران، ۲۰۱۲). از عوامل مؤثر بر میزان انتشار این ترکیبات توسط درختان می‌توان به عوامل داخلی گیاه (مانند نوع گونه، سن درخت، مرحله رشد درخت)، عوامل زیست‌محیطی (مانند رطوبت، دما، نور) و عوامل استرس‌زا اشاره کرد. در میان همه موارد، جنگل منبع اصلی ترکیبات آلی فرار بیوژنیک در زیست‌بوم است (لون^۸ و همکاران، ۲۰۲۰) ایزوپرن عمدتاً از درختان پهن‌برگ ساطع می‌شود، درحالی‌که مونوترپن‌ها عمدتاً توسط گونه‌های سوزنی‌برگ منتشر می‌شوند (آیدین^۹ و همکاران، ۲۰۱۴). کاشت گونه‌های درختی با میزان انتشار پایین ترکیبات آلی فرار بیوژنیک، مقاوم به خشکسالی و تنش‌های زیست‌محیطی، حداکثر زیست‌توده در سطح برگ و ظرفیت فتوسنتزی زیاد با روزه‌ای بالا^{۱۰} می‌تواند در کاهش سطح ازن مؤثر باشد (نواک و همکاران، ۲۰۱۸).

ایزوپرن (C₅H₈, 2-Methyl- 1,3-Butadiene) که به‌منزله انتشار غالب جهانی ترکیبات آلی فرار بیوژنیک شناخته شده است و حدود نیمی از کل شار (نرخ انتشار) جهانی ترکیبات آلی فرار بیوژنیک را به خود اختصاص می‌دهد (گونتر و همکاران، ۱۹۹۵). مونوترپن‌ها (C₁₀H₁₆) ایزوپرنوئیدهایی هستند که شامل دو واحد ایزوپرن بوده و فراریت و نرخ انتشار آن‌ها در مقایسه با ایزوپرن‌ها کم‌تر است (امینی پارسا و همکاران،

زیست‌بوم‌های طبیعی شامل جنگل‌ها و درختان و درختچه‌های شهری منافع و زیان‌هایی دارند. از مهم‌ترین منافع درختان می‌توان کاهش آلاینده‌ها، ذخیره و ترسیب کربن (نواک^۱ و همکاران، ۲۰۰۶)، جلوگیری از رواناب، کاهش مصرف انرژی ساختمان‌ها، افزایش رفاه بشر و غیره را نام برد. از مهم‌ترین خسارت‌ها یا زیان‌های درختان شهری می‌توان به انتشار ترکیبات آلی فرار بیوژنیک اشاره کرد که می‌تواند به تشکیل ذرات معلق و ازن کمک کند (چمیدس^۲ و همکاران، ۱۹۹۸). ترکیبات آلی فرار تولید شده توسط گیاهان در رشد، تولیدمثل و دفاع آن‌ها نقش دارند (پیرس^۳ و همکاران، ۱۹۹۸).

ترکیبات آلی فرار بیوژنیک^۴ گروهی از ترکیبات آلی هستند که از پوشش‌های گیاهی مانند درختان جنگلی، گیاهان مرتعی و فضای سبز شهری به‌طور طبیعی وارد جو می‌شوند. این ترکیبات از مهم‌ترین عوامل در تشکیل ازن تروپوسفری و آئروسول‌های آلی ثانویه به‌شمار می‌روند و نقش حیاتی در شیمی جو، کیفیت هوا و حتی تغییرات اقلیمی ایفا می‌کنند (گونتر^۵ و همکاران، ۱۹۹۹). همچنین درختان از طریق انتشار ترکیبات آلی فرار بیوژنیک که به‌منزله پیش‌ساز O₃ عمل می‌کنند، با رسوب O₃ روی برگ‌ها، بر غلظت ازن تأثیر می‌گذارند (فیتزکی^۶ و همکاران، ۲۰۱۹). در سال‌های اخیر، توجه جهانی به برآورد و مدل‌سازی دقیق این ترکیبات افزایش یافته است، چراکه آن‌ها مستقیماً بر استراتژی‌های کنترل آلودگی هوا اثرگذارند (پیرس و همکاران، ۱۹۹۸). همچنین سلامتی انسان از طریق دستگاه تنفسی و سیستم

⁶ Fitzky

⁷ WHO

⁸ Lun

⁹ Aydin

¹⁰ High ozone sinks

¹ Nowak

² Chameides

³ Pierce

⁴ Biogenic Volatile Organic Compounds

⁵ Guenther

۱۳۹۸). ساختار این دو ترکیب در شکل ۱ نشان داده شده است.

Name	Lifetime	Formula	Example	Structure
Isoprene	1-2 hrs	C_5H_8	Isoprene	
Monoterpenes	0.5-3 hrs	$C_{10}H_{16}$	α -pinene	

شکل ۱. ساختار ایزوپرن و مونوترپن

مطالعات متعددی نشان داده‌اند که جنگل‌های شهری و درختان نقش مهمی در بهبود کیفیت محیط‌زیست و کاهش آلودگی هوا ایفا می‌کنند (نواک و همکاران، ۲۰۰۶). بر همین اساس، این دیدگاه شکل گرفته است که افزایش پوشش درختی در محیط‌های شهری همواره اقدامی مطلوب بوده و می‌تواند به کاهش مشکلات زیست‌محیطی کمک کند. با این حال، روند فزاینده شهرنشینی، کم‌توجهی به حفظ و مدیریت درختان شهری، نبود جایگاه مناسب برای پوشش گیاهی در برخی سیاست‌های شهری و همچنین نادیده گرفتن هزینه‌ها و پیامدهای بالقوه مرتبط با جنگل‌های شهری، این فرض را به چالش کشیده است که اثر خالص جنگل‌های شهری بر کیفیت محیط‌زیست همواره مثبت باشد (اسکوبدو^۱ و همکاران، ۲۰۱۱).

پژوهش‌های مختلفی در زمینه بررسی انتشار ترکیبات آلی فرار بیوژنیک در نقاط مختلف جهان نیز انجام شده است.

آیدین و همکاران (۲۰۱۴) در ترکیه نشان دادند که درختان پهن‌برگ عمدتاً ایزوپرن منتشر می‌کنند، درحالی‌که درختان سوزنی‌برگ بیشتر مونوترپن منتشر می‌کنند. در پژوهش تکمیلی این محققان، نرخ انتشار BVOCs برای ۳۱ گونه درختی بررسی و مشخص شد که ایزوپرن‌ها و مونوترپن‌ها ترکیبات غالب بوده و نقش مهمی در تشکیل ازن و آئروسول‌های آلی ثانویه دارند.

¹ Escobedo

² Matsunaga

در یک مطالعه، میزان انتشار ایزوپرن، مونوترپن و سسکوئی‌ترپن از ۲۹ گونه درختی در فضای شهری توکیو اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که ۴۷ درصد از گونه‌های متداول شهری و ۲۵ درصد از گونه‌های پیشنهادی برای کاشت در آینده، هیچ BVOC فعالی منتشر نمی‌کنند. نویسندگان تأکید می‌کنند که انتخاب درختان با انتشار کم یا بدون انتشار BVOCs در طراحی فضای سبز شهری می‌تواند به کاهش ازن و بهبود کیفیت هوا کمک کند (ماتسوناگا^۲ و همکاران، ۲۰۱۷).

پژوهشی در شهر دنور آمریکا انتشار مونوترپن و سسکوئی‌ترپن نه گونه درختی شهری را بررسی کرده و نشان داده که تمامی این گونه‌ها دارای انتشار کم BVOC هستند. داده‌های تجربی نشان می‌دهد که استفاده از این درختان کم‌انتشار در برنامه‌های کاشت شهری می‌تواند به اندازه‌گیری از انتشار VOC توسط ۵۰۰۰۰۰ خودرو اثرگذار باشد. این مطالعه کاربرد سیاستی مهمی برای انتخاب گونه‌های درختی مناسب در مناطق شهری دارد (کرتیس^۳ و همکاران، ۲۰۱۴).

مطالعات اخیر نیز همچنان بر نقش کلیدی ترکیبات آلی فرار بیوژنیک در شیمی جو، تشکیل ازن تروپوسفری و آئروسول‌های آلی ثانویه تأکید داشته‌اند و برآورد دقیق انتشار این ترکیبات را برای مطالعات کیفیت هوا ضروری دانسته‌اند (پانجی^۴ و همکاران، ۲۰۲۴).

تحقیقات قبلی گونتر و همکاران (۱۹۹۵ و ۲۰۰۰) تأکید می‌کنند که تنوع گونه‌ای و شرایط اقلیمی مستقیماً بر میزان انتشار این ترکیبات تأثیر دارند. پژوهش گونتر، توسعه‌دهنده اصلی MEGAN، یکی از پایه‌ترین مقالات حوزه BVOCs محسوب می‌شود. مدل MEGAN2.1 برای تخمین انتشار ۱۴۷ ترکیب بیوژنیک طراحی شده و قابلیت استفاده در مدل‌های

³ Curtis

⁴ Panji

که شرایط اقلیمی و پوشش گیاهی می‌توانند موجب تفاوت چشمگیر در میزان انتشار BVOCs شوند؛ موضوعی که ضرورت بررسی مناطق اقلیمی مختلف ایران را برجسته می‌کند.

در یک مطالعه میدانی که در تهران انجام شد، سه گونه درختی شهری شامل *Robinia pseudoacacia*، *Platanus orientalis* و *Fraxinus rotundifolia* از نظر انتشار ایزوپرن و ترکیبات دیگر مانند 2-ethylhexanol بررسی شدند. نتایج نشان داد *P. orientalis* بالاترین نرخ انتشار را دارد؛ درحالی که *F. rotundifolia* انتشار کمتری داشت. این مطالعه بر اهمیت انتخاب آگاهانه گونه‌های درختی با انتشار پایین BVOCs برای بهبود کیفیت هوا در شهرهای آلوده؛ مانند تهران تأکید دارد (خدیو^۳ و همکاران، ۲۰۱۷). این یافته‌ها اهمیت شناخت الگوی انتشار BVOCs در شرایط محیطی مختلف ایران را نشان می‌دهد.

مطالعه داخلی با مدل Eco i-Tree، انتشار ایزوپرن و مونوترپن از پوشش درختی شهر تبریز تخمین زده شده است. نتایج نشان داد که تنها ۱۰ گونه از ۴۸ گونه، حدود ۹۳٪ از انتشار BVOCs را ایجاد کرده‌اند. گونه‌های *White poplar* و *Austrian pine* به ترتیب بیشترین میزان انتشار ایزوپرن و مونوترپن را دارند. مقاله تأکید دارد که استفاده از گونه‌های با انتشار کم در برنامه‌ریزی فضای سبز شهری ایران می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر کاهش آلودگی داشته باشد (امینی پارسا، ۱۳۹۸).

با توجه به بررسی پژوهش‌های انجام شده در داخل کشور، با وجود اهمیت ترکیبات آلی فرار بیوژنیک در شیمی جو و کیفیت هوا، مطالعات انجام شده در ایران در زمینه برآورد انتشار این ترکیبات همچنان محدود است.

محلی و جهانی را دارد. این پژوهش توضیح دقیقی از ساختار، پارامترهای ورودی و عملکرد مدل ارائه می‌دهد و مبنای بسیاری از تحقیقات در این حوزه است (گونتر و همکاران، ۲۰۱۲). مطالعه مروری وی در سال ۲۰۱۳، یکی از جامع‌ترین تحلیل‌ها درباره تنوع شیمیایی و زیستی BVOCها است. نویسنده با اشاره به اهمیت این ترکیبات در کیفیت هوا و تغییرات اقلیمی، بر لزوم مدل‌سازی دقیق آن‌ها تأکید می‌کند. در این پژوهش، چالش‌های مربوط به تنوع گیاهی و ترکیبی BVOCها و همچنین روش‌های اندازه‌گیری از جمله تکنیک‌های محفظه‌ای بررسی شده‌اند و پیشنهادهایی برای بهبود مدل‌سازی این ترکیبات ارائه شده است (گونتر، ۲۰۱۳).

ارزیابی‌های جدید نیز نشان داده‌اند که مدل MEGAN همچنان یکی از مهم‌ترین ابزارهای برآورد انتشار BVOCs در مقیاس منطقه‌ای و جهانی بوده و به‌طور گسترده در مطالعات اخیر مورد استفاده قرار می‌گیرد (اومامی^۱ و همکاران، ۲۰۲۴). همچنین بهبود داده‌های ورودی به‌ویژه پارامترهای هواشناسی، پوشش گیاهی و شاخص سطح برگ می‌تواند عدم قطعیت برآورد انتشار BVOCs توسط مدل MEGAN را به‌طور قابل توجهی کاهش دهد (کای^۲ و همکاران، ۲۰۲۵).

یکی از کامل‌ترین مرورهای منطقه‌ای بر منابع، روش‌ها و سیاست‌های BVOC در آسیا به‌ویژه تأکید دارد که در مناطق دارای پوشش گیاهی زیاد مانند چین و مناطق استوایی، BVOCها نقش مهمی در تشکیل ازن و آئروسول‌های آلی ثانویه دارند. نویسندگان ضمن بررسی تفاوت‌ها در نرخ انتشار بین مناطق و روش‌های مدل‌سازی، توصیه به استفاده از اندازه‌گیری‌های میدانی و مدل‌های مکانیکی دارند تا دقت برآورد افزایش یابد (لون و همکاران، ۲۰۲۰). نتایج این مطالعه نشان می‌دهد

³ Khedive¹ Oumami² Cai

مطالعاتی در مورد منافع و هزینه‌های درختان شهری در کشور انجام شده است که در آن‌ها منافع درختان شهری شامل ارزش اقتصادی پاک‌سازی آلاینده‌ها، ذخیره و ترسیب کربن برای یک محدوده جغرافیایی کوچک مانند یک پارک (یوسف‌پور^۱ و همکاران، ۲۰۲۴) یا انتشار ترکیبات آلی فرار بیوژنیک به وسیله درختان یک شهر (امینی پارسا و همکاران، ۱۳۹۸) محاسبه شده است؛ اما این موارد قابل تعمیم به اقلیم‌های مختلف کشور نیست. تنوع اقلیمی قابل توجه کشور، از مناطق مرطوب خزری تا نواحی خشک و نیمه‌خشک مرکزی، می‌تواند منجر به تفاوت‌های چشمگیر در میزان و الگوی انتشار BVOCs شود. بنابراین، ارزیابی و مقایسه انتشار این ترکیبات در مناطق مختلف ایران می‌تواند اطلاعات ارزشمندی برای توسعه سیاهه‌های انتشار، مدل‌سازی کیفیت هوا و برنامه‌ریزی‌های زیست‌محیطی فراهم کند.

در این راستا، تحقیق حاضر با هدف مقایسه و تحلیل انتشار ترکیبات آلی فرار بیوژنیک در دو اقلیم متفاوت ایران (استان‌های شمالی و یزد) با استفاده از مدل MEGAN انجام گرفته است. با وجود استفاده گسترده از مدل MEGAN برای برآورد انتشار ترکیبات آلی فرار در نقاط مختلف جهان، اغلب مطالعات پیشین بر یک اقلیم یا یک نوع پوشش گیاهی متمرکز بوده‌اند و مقایسه نظام‌مند رفتار انتشار این ترکیبات در اقلیم‌های کاملاً متفاوت، با استفاده از یک چارچوب مدل‌سازی یکسان، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. همچنین پژوهش‌های انجام‌شده در ایران عمدتاً به برآورد انتشار در یک شهر یا گونه‌های محدود درختی و مدل‌های دیگر اختصاص داشته و تاکنون مقایسه‌ای مبتنی بر مدل MEGAN بین دو اقلیم کاملاً متفاوت کشور انجام نشده است. نوآوری پژوهش حاضر در چند جنبه قابل بیان است: (۱) مقایسه نظام‌مند انتشار ایزوپرن و مونوترپن در دو منطقه با شرایط اقلیمی و پوشش گیاهی کاملاً متفاوت شامل استان‌های

شمالی و استان یزد؛ (۲) تحلیل همزمان تغییرات مکانی و زمانی انتشار این ترکیبات با استفاده از داده‌های هواشناسی، شاخص سطح برگ و نوع پوشش گیاهی در چارچوب مدل MEGAN؛ (۳) ارائه نتایجی که می‌تواند به‌منزله مبنایی برای توسعه سیاهه انتشار BVOCs و مطالعات کیفیت هوا در ایران مورد استفاده قرار گیرد. بدین ترتیب، این پژوهش شکاف موجود در مطالعات منطقه‌ای انتشار BVOCs در ایران را تا حدی برطرف می‌کند؛ (۴) علاوه بر این، نتایج این پژوهش می‌تواند به‌منزله داده‌های ورودی برای مدل‌های انتقال و شیمی جو مورد استفاده قرار گیرد. با توجه به نقش کلیدی ایزوپرن و مونوترپن در واکنش‌های فتوشیمیایی و تشکیل ازن تروپوسفری و ذرات آلی ثانویه، برآورد دقیق انتشار این ترکیبات می‌تواند موجب کاهش عدم قطعیت در شبیه‌سازی کیفیت هوا و افزایش دقت پیش‌بینی آلاینده‌های ثانویه در مطالعات آینده شود.

مواد و روش‌ها

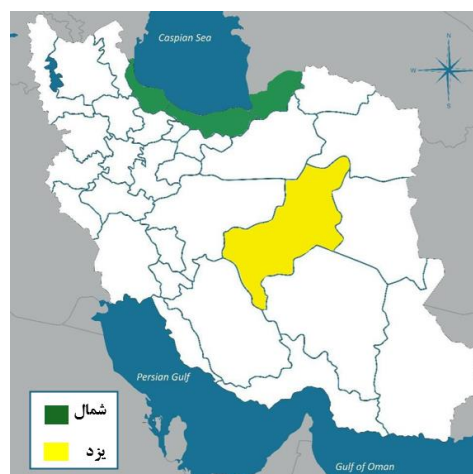
منطقه مورد مطالعه

در این تحقیق، دو ناحیه با شرایط اقلیمی متفاوت به‌منزله منطقه‌های مطالعه انتخاب شدند تا امکان تحلیل مقایسه‌ای انتشار ترکیبات آلی فرار بیوژنیک فراهم گردد: استان یزد به‌منزله نمونه‌ای از اقلیم خشک مرکزی و استان‌های شمالی ایران شامل سه استان گیلان، مازندران و گلستان به‌منزله نماینده اقلیم مرطوب خزری.

با توجه به اینکه دما، تابش خورشیدی، نوع پوشش گیاهی و شاخص سطح برگ از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر انتشار BVOCs در مدل MEGAN هستند، انتخاب این دو منطقه امکان بررسی اثر شرایط اقلیمی و پوشش گیاهی متفاوت بر الگوی انتشار این ترکیبات را فراهم

¹ Yousofpour

می‌کند. موقعیت جغرافیایی مناطق مورد مطالعه در شکل ۳ ارائه شده است.



شکل ۲. نقشه موقعیت جغرافیایی مناطق مورد مطالعه

استان یزد

استان یزد یکی از استان‌های مرکزی ایران با مرکزیت کلان‌شهر یزد است. در فصول بهار و تابستان، آب‌وهوای بیش‌تر مناطق استان، گرم و خشک و در فصول زمستان و پاییز سرد و نسبتاً مرطوب و دارای پوشش گیاهی پراکنده است.

استان‌های شمالی ایران

شمال ایران یا به‌طور کوتاه شمال، اصطلاحی جغرافیایی است که به سرزمینی نسبتاً کم‌وسعت اما سرسبز و حاصلخیز شامل استان‌های گیلان، مازندران و گلستان گفته می‌شود. استان‌های شمالی کشور در حاشیه جنوبی دریای خزر قرار داشته و به‌دلیل برخورداری از بارش بیشتر، رطوبت نسبی بالاتر و پوشش جنگلی متراکم، از مهم‌ترین مناطق دارای پوشش گیاهی انبوه در کشور محسوب می‌شوند (مرکز آمار ایران، ۱۳۹۵).

انتخاب مدل مناسب

در اغلب پژوهش‌های مرتبط با مدل‌سازی انتشار ترکیبات آلی فرار بیوژنیک، دو مدل $BEIS^1$ و $MEGAN^2$ بیش‌تر در مطالعات مورد استفاده قرار گرفته‌اند. مدل $BEIS$ عمدتاً در بستر نرم‌افزارهایی مانند i-Tree Eco توسعه یافته و تمرکز آن بر تخمین انتشارات گونه‌های گیاهی شهری، بر اساس داده‌های اقلیمی و زیستی ایالات متحده است. در مقابل، مدل $MEGAN$ به‌منزله یک مدل جهانی با قابلیت تفکیک فضایی بالا، برای شرایط اقلیمی گوناگون و پوشش‌های گیاهی متنوع طراحی شده و از انعطاف‌پذیری بیشتری برای مدل‌سازی منطقه‌ای و جهانی برخوردار است. در این بخش جزئیات این مدل‌ها بیش‌تر مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

مدل $BEIS$

در مطالعات انجام شده بر اساس نرم‌افزار $i-Tree Eco$ ، از $BEIS$ استفاده می‌شود که در آن میزان انتشار ترکیبات آلی فرار بیوژنیک بستگی به گونه درخت، زیست‌توده برگ، دمای هوا و سایر عوامل محیطی دارد (آژانس حفاظت محیط‌زیست ایالات متحده^۳، ۲۰۱۷). این نرم‌افزار برآورد ایزوپرن و مونوترپن‌ها که دو دسته از ترکیبات غالب ساطع شده از درختان هستند را به‌صورت ساعتی انجام می‌دهد. برآورد زیست‌توده برگ از داده‌های میدانی و ضرب کردن در ضرایب انتشار خاص گونه یا خانواده برای تولید سطوح استاندارد انتشار تا ۳۰ درجه سلسیوس و پرتوافشانی کنشگر فتوسنتزی^۴ ۱۰۰۰ میکرومول بر متر مربع در ثانیه به دست می‌آید (نواک و همکاران، ۲۰۰۲). انتشارات استاندارد بر اساس ضرایب تصحیح نور و دما و داده‌های هواشناسی محلی به انتشارات واقعی تبدیل می‌شوند (گرون^۵ و همکاران، ۱۹۹۴).

³ U.S. EPA

⁴ PAR

⁵ Geron

¹ Biogenic Emissions Inventory System

² Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature

انتشار ترکیبات آلی فرار (E) در واحد

$\mu gC/tree/hr$ برای ایزوپرن و مونوترپن ها به صورت زیر برآورد می گردد:

$$E = B_E \cdot B \cdot \gamma \quad (1)$$

B_E نرخ انتشار پایه جنس در واحد $\mu gC/g$

$leaf\ dry\ weight/hr$ و پرتوافشانی کشگر

فتوستتزی ۱۰۰۰ میکرو مول بر متر مربع در ثانیه، B وزن

خشک زیست توده برگ برای گونه ها در واحد گرم

است و γ که برای ایزوپرن به صورت زیر محاسبه

می شود (گونتر و همکاران، ۱۹۹۵):

$$\gamma = \left[\frac{\alpha \cdot c_{L1} L / (1 + \alpha^2 \cdot L^2)^{1/2}}{[C_{T1}(T - T_S) / R \cdot T_S \cdot T] / (0.961 + \exp[c_{T2}(T - T_M)])} \right] \quad (2)$$

که در آن L ، $c_{L1} = \alpha$ ، $1.066 = 1/0.027$ شار

پرتوافشانی کشگر فتوستتزی، R ثابت گاز ایده آل

(۸.۳۱۴ ژول بر مول کلون)، T دمای برگ بر حسب

کلون که دمای هوا فرض می شود، T_S دمای استاندارد

(۳۰۳ کلون)، $T_M = 314$ کلون، $C_{T1} = 95000$

ژول بر مول، $C_{T2} = 230000$ ژول بر مول در نظر گرفته

شده است.

از آنجا که پرتوافشانی کشگر فتوستتزی میزان انتشار

ایزوپرن را به شدت کنترل می کند، پرتوافشانی کشگر

فتوستتزی در ۳۰ سطح کانوپی به منزله تابعی از PAR

بالای کانوپی با مدل محیط کانوپی ضد آفتاب^۱ با شناسه

گستره برگ مشتق شده از اندازه گیری های محیطی

تخمین زده شده است.

برای مونوترپن ها:

$$\gamma = \exp[\beta(T - T_S)] \quad (2)$$

که در آن T دمای برگ بر حسب کلون که دمای

هوا فرض می شود، T_S دمای استاندارد (۳۰۳ درجه) و

$$\beta = 0.09$$

برای برآورد نرخ انتشار فردی هر درخت، کل

انتشار جنس ها به سطح درخت یا سطح گونه های

متناسب با هر درخت یا زیست توده گونه ها در جنس

برگردانده می شود.

مدل $MEGAN$

مدل انتشار گازها و هواویزها از طبیعت که

به اختصار $MEGAN$ نام دارد، برای برآورد انتشار

ترکیبات آلی فرار بیوژنیک زیست بوم های شهری،

روستایی و کشاورزی استفاده می شود که می تواند در

جو تأثیر گذار باشد. $MEGAN$ دارای الگوریتم های

مکانیکی ساده ای است که برای فرایندهای اصلی

شناخته شده کنترل انتشارات بیوژنیک محاسبه می شود.

$MEGAN$ مدل جهانی با ۱ کیلومتر (یا کمتر) وضوح

فضایی است که می تواند برای مدل سازی کیفیت هوای

منطقه ای و مطالعات مدل سازی سیستم زمینی جهانی

استفاده شود. میزان انتشار را می توان با استفاده از

داده های آب و هوایی و پوشش زمین تخمین زد.

میزان انتشار (Fi) گونه شیمیایی i از زیست بوم های

زمینی در واحد ($\mu g m^{-2} h^{-1}$) برای ۱۹ کلاس

ترکیبی (i) به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$F_i = \gamma_i \sum \epsilon_{i,j} \chi_j \quad (3)$$

که در آن $\epsilon_{i,j}$ ضریب انتشار در شرایط استاندارد

برای نوع پوشش گیاهی j با پوشش منطقه ای جعبه

شبکه کسری χ_j محاسبه می شود. ضریب فعالیت^۳ γ_i

فرایندهای کنترل کننده واکنش های انتشار در شرایط

محیطی و فیزیولوژیکی را محاسبه می کند. از ۱۹ دسته

برای برآورد ورودی طرح های شیمی جوی با تجزیه

³ Activity factor

¹ Sun fleck canopy environment model

² fractional grid box areal coverage

اولیه به ۱۴۷ ترکیب جداگانه و سپس به دسته‌های مناسب برای طرح‌های شیمیایی تبدیل می‌شوند.

ضرایب انتشار

گوانتر و همکاران (۲۰۰۶)، چندین گزینه را برای تعریف انواع انتشار در *MEGAN2.0* برای تشخیص نیازهای مختلف محلی و منطقه‌ای (که ممکن است شامل داده‌های ترکیب گونه‌های گیاهی دقیق باشد) و مدل‌سازی جهانی ارائه داد. این مدل به کاربران این امکان را می‌دهد که طرح‌های نوع انتشار پوشش گیاهی را از جزئیات (به‌منزله مثال گونه‌های گیاهی منفرد یا حتی زیر گونه‌ها) تا کلی (برای مثال، چند دسته پوشش گیاهی وسیع) سفارشی‌سازی کند. عوامل انتشار می‌تواند از نقشه‌های مشبک بر اساس ترکیب گونه‌ها و ضرایب انتشار ویژه گونه‌ها یا با استفاده از توزیع نوع عملکردی گیاه^۱ و عوامل انتشار خاص نوع عملکردی گیاه مشخص شود.

الگوریتم‌های فعالیت انتشار^۲

انتشارات *MEGAN* براساس یک مدل مکانیکی

ساده است که فرایندهای عمده‌ای را که باعث ایجاد تغییرات در انتشار می‌شود، در نظر می‌گیرد. عامل فعالیت برای هر کلاس ترکیب (γ_i) پاسخ انتشار به نور (γ_P)، دما (γ_T)، سن برگ (γ_A)، رطوبت خاک (γ_{SM})، شناسه گستره برگ و مهار دی‌اکسید کربن (γ_C) به صورت زیر خواهد بود:

$$\gamma_i = C_{CE} L A I \gamma_{P,i} \gamma_{T,i} \gamma_{A,i} \gamma_{SM,i} \gamma_{C,i} \quad (۴)$$

ضریب محیطی سایبان (C_{CE})^۳ ارزشی است که

برای شرایط استاندارد $\gamma = 1$ تعیین شده است و وابسته به مدل محیطی سایبان مورد استفاده دارد. برای مثال مقدار ۰/۳ برای مدل محیطی سایبان *CLM4* و مقدار ۰/۵۷

برای مدل محیطی سایبان *MEGAN2.1 WRF-AQ* مورد استفاده قرار می‌گیرد.

انتشارات هر کلاس ترکیبی شامل یک کسر وابسته به نور است (به صورت جدول *LDF* طبقه‌بندی شده) با بقیه کسر که مستقل از نور است و تحت تأثیر نور قرار نمی‌گیرد ($LIF = 1 - LDF$). عامل فعالیت انتشار برای واکنش نوری انتشارات به صورت زیر برآورد می‌گردد:

$$\gamma_{P,i} = (1 - LDF_i) + LDF_i \gamma_{P_LDF} \quad (۵)$$

که در آن γ_{P_LDF} از عامل فعالیت وابسته به نور پیروی می‌کند و توسط گوانتر و همکاران (۲۰۰۶) برای ایزوپرن به صورت زیر توضیح داده شده است:

$$\gamma_{P_LDF} = C_P [(\alpha \times PPFD) / ((1 + \alpha^2 \times PPFD^2)^{0.5})] \quad (۶)$$

که $PPFD$ چگالی شار فوتون فتوسنتزی (میکرومول بر مترمربع در ثانیه)، C_P و α به صورت زیر برآورد می‌شوند:

$$\alpha = 0.004 - 0.0005 \ln(P_{240}) \quad (۷)$$

$$C_P = 0.0468 \times \exp(0.0005 \times [P_{24} - P_S]) \times [P_{240}]^{0.6} \quad (۸)$$

که در آن P_S نشان‌دهنده شرایط استاندارد برای

$PPFD$ میانگین ۲۴ ساعت گذشته و برابر ۲۰۰ میکرومول بر مترمربع در ثانیه برای برگ‌های آفتابی و ۵۰ میکرومول بر مترمربع در ثانیه برای برگ‌های سایه است. همچنین P_{24} میانگین $PPFD$ برای ۲۴ ساعت گذشته و P_{240} میانگین $PPFD$ برای ۲۴۰ ساعت

^۳ canopy environment coefficient

^۱ Plant Functional Type (PFT)

^۲ Emission activity algorithms

گذشته است. واکنش نور به طور جداگانه برای برگ‌های آفتابی و سایه‌دار در هر عمق سایبان با استفاده از $PPFD$ با استفاده از مدل محیطی سایبان اعمال می‌شود.

ضریب (عامل) فعالیت دما نیز میانگین وزنی یک بخش وابسته به نور و یک بخش مستقل از نور است:

$$\begin{aligned} Y_{T,i} &= (1 - LDF_i)Y_{T_LIF,i} \\ &+ LDF_iY_{T_LDF,i} \end{aligned} \quad (9)$$

واکنش بخش وابسته به نور به دنبال واکنش ایزوپرن توسط گوتتر و همکاران (۲۰۰۶) به صورت زیر توصیف شده است:

$$\begin{aligned} Y_{T_LDF,i} &= E_{opt} \\ &\times [C_{T2} \\ &\times \exp(C_{T1,i} \times x) / (C_{T2} \\ &- C_{T1,i}) \times (1 \\ &- \exp(C_{T2} \\ &\times x)))] \end{aligned} \quad (10)$$

که در آن $x = [(1/T_{opt}) - (1/T)] / 0.00831$ دمای برگ بر حسب کلون، C_{T2} و $C_{T1,i}$ برابر ۲۳۰، ضرایب تعیین شده تجربی هستند.

$$T_{opt} = 313 + (0.6 \times (T_{240} - T_s)) \quad (11)$$

$$\begin{aligned} E_{opt} &= C_{eo,i} \times \exp(0.05 \\ &\times (T_{24} - T_s)) \\ &\times \exp(0.05(T_{240} - T_s)) \end{aligned} \quad (12)$$

که T_s شرایط استاندارد دمای برگ را نشان می‌دهد و برابر ۲۹۷ کلون است. T_{24} میانگین دمای برگ در ۲۴ ساعت گذشته، T_{240} میانگین دمای برگ در ۲۴۰

ساعت گذشته و $C_{eo,i}$ یک ضریب تجربی وابسته به کلاس انتشار است. واکنش بخش مستقل از نور از تابع واکنش دمایی نمایی مونوترین پیروی می‌کند (گوتتر و همکاران، ۱۹۹۳):

$$Y_{T_LIF,i} = \exp(\beta_i(T - T_s)) \quad (13)$$

که در آن β_i یک ضریب تعیین شده تجربی است. ضریب فعالیت انتشار سن برگ به صورت زیر برآورد می‌گردد:

$$\begin{aligned} Y_{A,i} &= F_{new} \times A_{new,i} \\ &+ F_{gro} \\ &\times A_{gro,i} \\ &+ F_{mat} \\ &\times A_{mat,i} \\ &+ F_{sen} \\ &\times A_{sen,i} \end{aligned} \quad (14)$$

که در آن $A_{mat,i}$ ، $A_{gro,i}$ ، $A_{new,i}$ و $A_{sen,i}$ ضرایب تجربی که نرخ انتشار نسبی را به ترتیب برای برگ‌های جدید، درحال رشد، بالغ و پیر توصیف می‌کنند. این مدل برای برآورد بخش‌های سن برگ سایبان را به ۴ قسمت شاخ‌وبرگ جدید (F_{new})، شاخ‌وبرگ درحال رشد (F_{gro})، شاخ‌وبرگ بالغ (F_{mat}) و شاخ‌وبرگ پیر (F_{sen}) تقسیم می‌کند.

الگوریتم وابستگی رطوبت خاک برای انتشار ایزوپرن به صورت زیر برآورد می‌گردد (گوتتر و همکاران، ۲۰۰۶):

$$Y_{SM,isoprene} = \begin{cases} 1 & \theta > \theta_1 \\ & \theta_1 \end{cases} \quad (15)$$

$$Y_{SM,isoprene} = \frac{\theta - \theta_w}{\Delta\theta_1} \quad \theta_w < \theta < \theta_1 \quad (16)$$

جهت اجرای مدل *MEGAN*، مراحل زیر دنبال

شد:

۱. انتخاب دو منطقه هدف:

استان یزد به منزله نماینده اقلیم خشک مرکزی
سه استان شمالی (گیلان، مازندران، گلستان) به منزله
نماینده اقلیم مرطوب خیزی

۲. تهیه داده‌های ورودی برای سال ۱۴۰۱ (۲۰۲۲) با

تفکیک زمانی چهار فصل

سال ۱۴۰۱ به دلیل دسترسی هم‌زمان به داده‌های

کامل هواشناسی و پوشش گیاهی مورد نیاز مدل و

امکان اجرای یکپارچه شبیه‌سازی برای مناطق مورد

مطالعه انتخاب شد.

در این پژوهش، به منظور برآورد انتشار ترکیبات

آلی فرار بیوژنیک در مناطق مورد مطالعه، از مدل

MEGAN استفاده شد. داده‌های ورودی مورد نیاز مدل

شامل دمای هوا، تابش خورشیدی، شاخص سطح برگ

و نوع پوشش گیاهی بودند. داده‌های هواشناسی شامل

دما و تابش خورشیدی از سازمان هواشناسی کشور تهیه

و در قالب داده‌های مورد نیاز مدل پردازش شدند.

همچنین اطلاعات مربوط به شاخص سطح برگ، نوع

پوشش گیاهی و ضرایب انتشار گونه‌های گیاهی از

پایگاه داده پیش فرض مدل *MEGAN* که مبتنی بر

محصولات سنجش از دور *MODIS* است، استخراج

گردید. پس از آماده‌سازی داده‌های ورودی، مدل برای

مناطق مورد مطالعه اجرا و میزان انتشار ایزوپرن و

مونوترپن در فصل‌های مختلف سال محاسبه شد.

۳. برآورد و استخراج خروجی مدل برای دو ترکیب

اصلی:

ایزوپرن و مونوترپن

۴. تجزیه و تحلیل مکانی و زمانی انتشار *BVOCs* با

استفاده از نقشه‌های مکانی و نمودارهای سری زمانی

$$\gamma_{SM, isoprene} = 0 \quad \theta$$

$$< \theta_w \quad (17)$$

که در آن θ رطوبت خاک (مقدار آب حجمی^۱،

مترمکعب در مترمکعب)، θ_w نقطه پژمردگی (سطح

رطوبت خاک که پایین‌تر از آن گیاه نمی‌تواند آب را از

خاک استخراج کند، مترمکعب در مترمکعب)، $\theta_w = 0.04$

$\Delta\theta_1$ یک پارامتر تجربی و θ_1 به صورت $\theta_w +$

$\Delta\theta_1$ تعریف شده است. برآوردهای θ و θ_w توسط

مدل‌های آب‌وهوایی ارائه شده است.

از معادلات فوق فقط برای برآورد انتشار ایزوپرن

استفاده می‌شود. به همه ترکیبات دیگر مقدار $\gamma_{SM, i}$

۱ اختصاص داده می‌شود.

ضریب فعالیت انتشار ایزوپرن در ارتباط با مهار

دی‌اکسید کربن از معادله زیر پیروی می‌کند (هلد^۲ و

همکاران، ۲۰۰۹):

$$\gamma_{CO_2, isoprene}$$

$$= I_{smax}$$

$$- [(I_{smax}(C_i)^h)$$

$$/ ((C^*)^h$$

$$+ (C_i)^h)] \quad (18)$$

که در آن I_{smax} ، C^* و h ضرایب تعیین شده

تجربی هستند و غلظت دی‌اکسید کربن داخلی، C_i ، ۷۰

درصد غلظت دی‌اکسید کربن محیط برآورده شده است.

معادله ۱۹ فقط برای برآورد انتشار ایزوپرن استفاده

می‌شود. به همه ترکیبات دیگر مقدار $\gamma_{CO_2, i} = 1$

اختصاص داده می‌شود.

براساس بررسی انجام‌شده، مدل *MEGAN* به منزله

یک مدل جهانی با قابلیت تفکیک فضایی بالا، برای

شرایط اقلیمی گوناگون و پوشش‌های گیاهی متنوع

طراحی شده و از انعطاف‌پذیری بیشتری برای مدل‌سازی

منطقه‌ای و جهانی برخوردار است و به همین علت، مدل

MEGAN برای اجرا در شرایط ایران انتخاب شد.

² Heald

¹ volumetric water content

در گام تحلیل، خروجی‌های مدل برای چهار فصل سال بررسی شد تا الگوی فصلی انتشار در مناطق مورد مطالعه مشخص گردد. در کنار آن، برای تحلیل‌های مکانی از نقشه‌های تفکیکی روزانه برای دوره‌های منتخب (بهار، تابستان، پاییز، زمستان) استفاده شد. در نهایت، برای مقایسه تطبیقی بین دو منطقه، میانگین و نوسان فصلی مقادیر انتشار برای ایزوپرن و مونوترپن محاسبه و تحلیل شد تا تفاوت‌های اقلیمی و پوشش گیاهی در انتشار این ترکیبات تبیین گردد. به منظور بررسی سازگاری نتایج حاصل از مدل، الگوهای زمانی و مکانی انتشار BVOCs با رفتار مورد انتظار متغیرهای اقلیمی مؤثر بر انتشار شامل دما، تابش خورشیدی و ویژگی‌های پوشش گیاهی مقایسه شد. همچنین نتایج حاصل با یافته‌های مطالعات پیشین در زمینه انتشار ترکیبات آلی فرار بیوژنیک مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج

ارائه سیاهه انتشار ترکیبات آلی فرار بیوژنیک می‌تواند در تکمیل سیاهه انتشار آلاینده‌ها سهم به‌سزایی داشته باشد. در این بخش، نتایج حاصل از اجرای مدل MEGAN برای دو منطقه متفاوت اقلیمی یعنی استان یزد (با اقلیم خشک و نیمه‌خشک) و مناطق شمالی کشور (با اقلیم مرطوب و جنگلی) مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. هدف از این تحلیل، بررسی تفاوت‌های مکانی و زمانی در انتشار ایزوپرن و مونوترپن به‌منزله مهم‌ترین ترکیبات آلی فرار بیوژنیک است.

با توجه به محدودیت داده‌های اندازه‌گیری مستقیم ترکیبات آلی فرار بیوژنیک در مناطق مورد مطالعه، امکان اعتبارسنجی مستقیم خروجی‌های مدل MEGAN فراهم نبود. بنابراین، ارزیابی نتایج بر اساس بررسی سازگاری الگوهای زمانی و مکانی انتشار با رفتار شناخته‌شده متغیرهای اقلیمی مؤثر بر انتشار BVOCs

شامل دما، تابش خورشیدی و ویژگی‌های پوشش گیاهی انجام شد. همچنین نتایج حاصل با دامنه مقادیر گزارش‌شده در مطالعات پیشین مقایسه گردید.

در این پژوهش، تحلیل‌ها بر اساس سال ۱۴۰۱ انجام شده است. معادل میلادی ماه‌های منتخب صرفاً جهت انطباق با خروجی‌های مدل و داده‌های ورودی ارائه شده‌اند.

خروجی‌های مدل MEGAN در این پژوهش بر حسب مول بر ثانیه گزارش شده‌اند و تمام مقادیر ارائه‌شده در شکل‌ها و نمودارها بر همین اساس تفسیر شده‌اند.

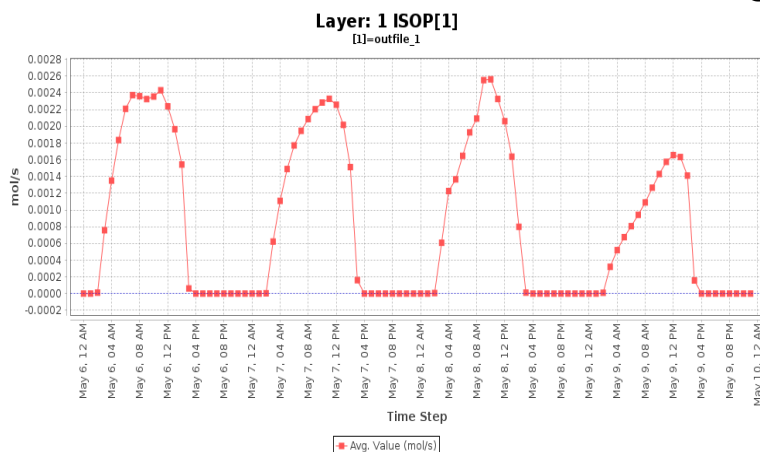
تحلیل انتشار ایزوپرن و مونوترپن در استان یزد

به‌منظور بررسی تغییرات فصلی انتشار ایزوپرن و مونوترپن، چهار ماه نماینده فصل‌های بهار (اردیبهشت)، تابستان (مرداد)، پاییز (آبان) و زمستان (بهمن) انتخاب شدند. نتایج حاصل از خروجی‌های مدل نشان می‌دهند که انتشار ایزوپرن در یزد به‌طور محسوسی به نواحی محدود دارای پوشش گیاهی وابسته است. در اردیبهشت، با وجود افزایش تدریجی دما، مقادیر هنوز پایین‌ترند، و در فصل پاییز (آبان) و زمستان (بهمن) میزان انتشار بسیار کم یا نزدیک به صفر است. نمودارهای سری زمانی ارائه‌شده در شکل‌های ۳ تا ۶ نیز این الگو را تأیید می‌کنند؛ اوج انتشار ایزوپرن در مردادماه (میان تابستان) و حداقل آن در زمستان مشاهده می‌شود. این موضوع، نشان‌دهنده تأثیر مستقیم دما و تابش خورشیدی بر سازوکارهای فیزیولوژیکی تولید ایزوپرن در منطقه خشک یزد است.

شکل ۳، روند انتشار ایزوپرن در یزد در ماه اردیبهشت را نشان می‌دهد که مطابق آن، مقادیر ایزوپرن نسبتاً پایین اما قابل تشخیص هستند. این امر نشان‌دهنده

پایین تر است، اما واکنش دمایی مدل MEGAN به صورت تدریجی در حال افزایش است.

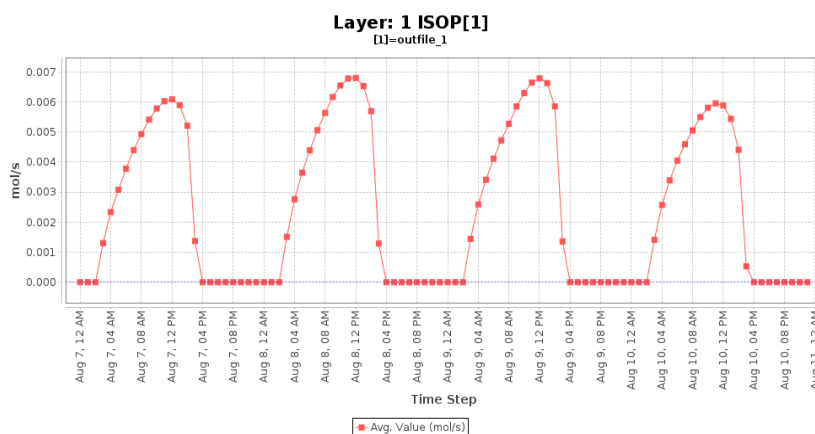
آغاز فعالیت فیزیولوژیکی گیاهان در اثر افزایش دما و تابش خورشیدی است. به دلیل اقلیم خشک و کم پوشش استان یزد، اگرچه سطح انتشار نسبت به مناطق جنگلی



شکل ۳. نمودار سری زمانی انتشار ایزوپرن استان یزد، می ۲۰۲۲ (اردیبهشت ۱۴۰۱)

MEGAN می گردد. در مناطق محدود دارای پوشش سبز در یزد، این مقادیر به اوج می رسند و گرچه منطقه از نظر وسعت پوشش گیاهی محدود است، اما شرایط محیطی سبب تشدید انتشار می شود.

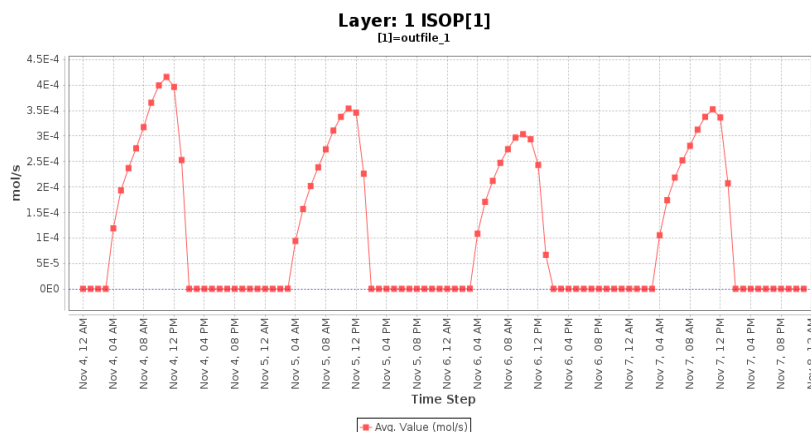
همان طور که در شکل ۴ مشاهده می شود، بیشترین مقادیر ایزوپرن در مردادماه رخ داده است. افزایش دما، شدت تابش و رسیدن به اوج فیزیولوژی برگ ها باعث بیشینه شدن ضریب فعالیت محیطی (γ) در مدل



شکل ۴. نمودار سری زمانی انتشار ایزوپرن استان یزد، اوت ۲۰۲۲ (مرداد ۱۴۰۱)

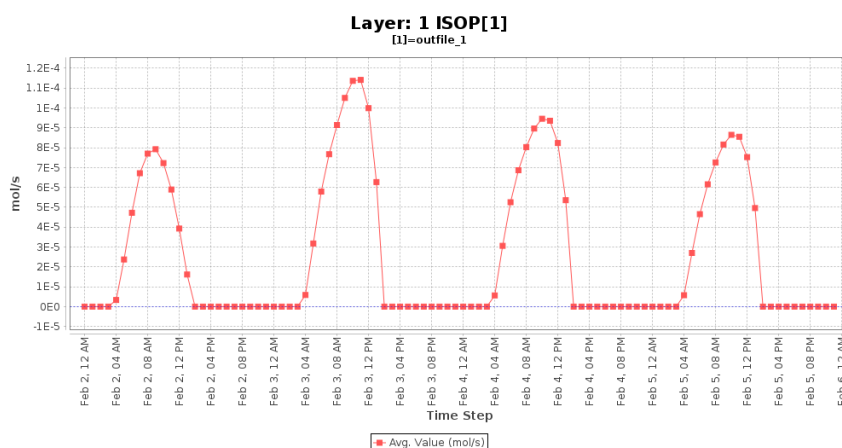
کمتر می شود. ایزوپرن به منزله ترکیبی با وابستگی شدید به نور، در این دوره در یزد تقریباً به صفر می رسد.

در فصل پاییز، کاهش دما و طول روز باعث افت قابل توجه مقادیر ایزوپرن شده است (شکل ۵). با ورود به فصل پاییز، فعالیت آنزیمی کاهش یافته و تأثیر تابش



شکل ۵. نمودار سری زمانی انتشار ایزوپرن استان یزد، نوامبر ۲۰۲۲ (آبان ۱۴۰۱)

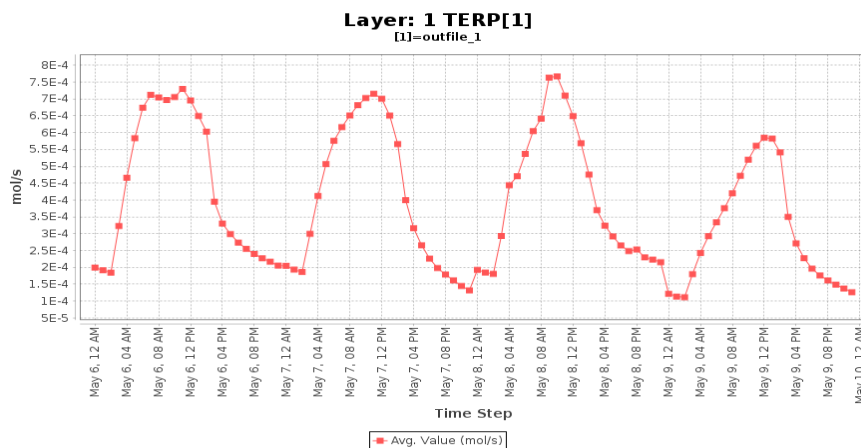
در زمستان انتشار ایزوپرن تقریباً صفر است. در زمستان نه تنها دما و نور به حداقل خود می‌رسند، بلکه زیست توده برگ فعال نیز وجود ندارد. بنابراین، شرایط انتشار در این دوره غیر فعال است (شکل ۶).



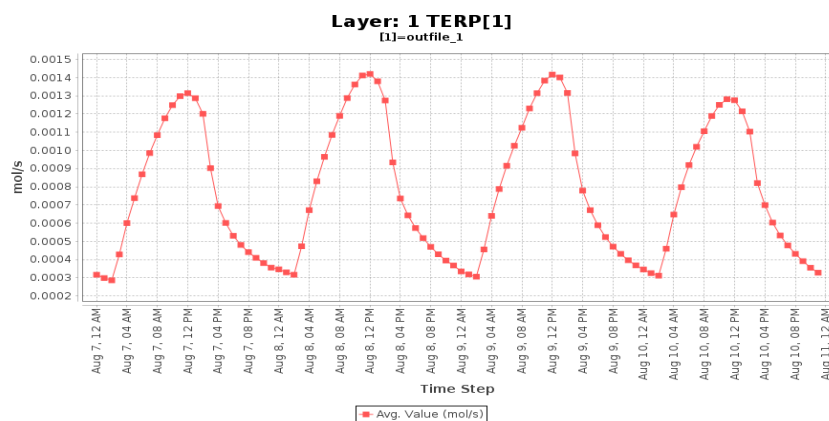
شکل ۶. نمودار سری زمانی انتشار ایزوپرن استان یزد، فوریه ۲۰۲۳ (بهمن ۱۴۰۱)

می‌شود. انتشار در تابستان به اوج می‌رسد و در سایر فصول تقریباً غیر فعال است. این امر نشان‌دهنده محدودیت شدید اقلیم خشک در فراهم کردن شرایط بیوشیمیایی لازم برای تولید ترپن‌هاست. در مقابل، پایداری مونوترپن در فصول گذار (بهار و پاییز) هرچند اندک، نشان از نقش گونه‌های همیشه‌سبز در حفظ سطح پایه انتشار دارد.

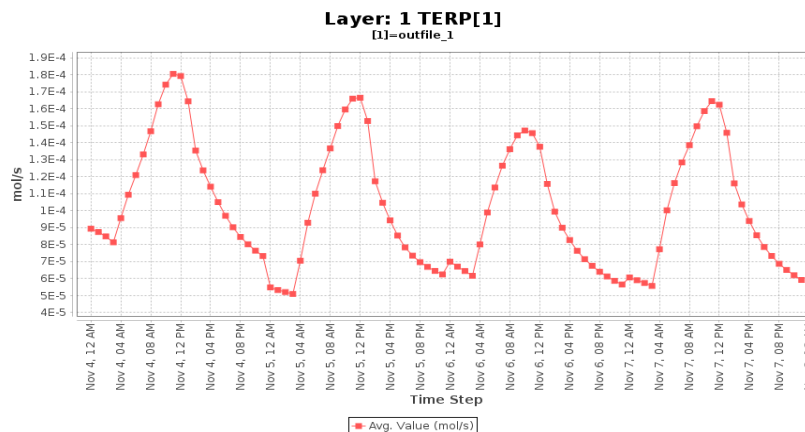
نقشه‌های انتشار مونوترپن در یزد الگوی مشابهی با ایزوپرن دارند، اما مقادیر کلی پایین‌تر است (شکل ۷ تا ۱۰). بیشینه انتشار در مرداد دیده می‌شود، در حالی که در اردیبهشت و آبان، انتشار در مناطق سبز محدود است و در زمستان تقریباً حذف می‌شود. این نمودارهای سری زمانی، نوسانات ملایم‌تری نسبت به ایزوپرن نشان می‌دهند، اما هنوز تأثیر دما و فصل به وضوح مشاهده



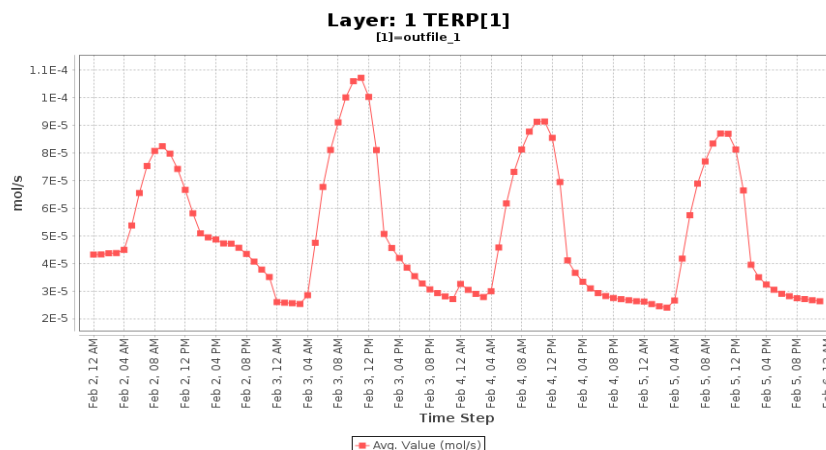
شکل ۷. نمودار سری زمانی انتشار مونوترین استان یزد، می ۲۰۲۲ (اردیبهشت ۱۴۰۱)



شکل ۸. نمودار سری زمانی انتشار مونوترین استان یزد، اوت ۲۰۲۲ (مرداد ۱۴۰۱)



شکل ۹. نمودار سری زمانی انتشار مونوترین استان یزد، نوامبر ۲۰۲۲ (آبان ۱۴۰۱)



شکل ۱۰. نمودار سری زمانی انتشار مونوترپن استان یزد، فوریه ۲۰۲۳ (بهمن ۱۴۰۱)

تابستان و پاییز با شیب ملایم در حال افزایش یا کاهش است، و حتی در زمستان نیز مقادیر غیرصفر باقی می‌مانند.

شکل ۱۱، روند انتشار ایزوپرن در اردیبهشت در شمال کشور را نشان می‌دهد که مطابق آن، بهار با پوشش گیاهی متراکم، بارندگی و دمای ملایم همراه است. نمودارهای سری زمانی نشان می‌دهند که برخلاف یزد، انتشار در این فصل نه تنها آغاز شده بلکه از همان ابتدا در سطوح بالاتری قرار دارد. علت اصلی، وجود جنگل‌های هیرکانی با درختان پهن برگ و همیشه‌سبز است که سهم بالایی در انتشار ایزوپرن دارند.

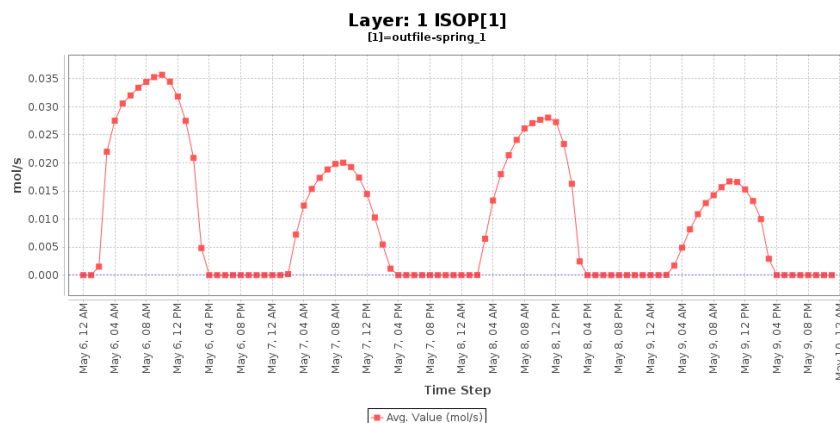
در شمال ایران، با توجه به تنوع گونه‌های پهن برگ، رطوبت بالا، و دمای ملایم، ایزوپرن از اوایل بهار وارد فاز فعال می‌شود. برخلاف یزد، در این منطقه حتی ماه‌های بهار نیز دارای مقادیر متوسط تا بالای انتشار هستند. برگ‌های جدید نقش فعالی در افزایش ضریب فعالیت محیطی (۷) در این مدل دارند.

مونوترپن‌ها برخلاف ایزوپرن، وابستگی کمتری به نور دارند و بیشتر تحت تأثیر دما و سن برگ هستند. در یزد، حتی در اوج گرما، میزان مونوترپن به دلیل کمبود گونه‌های درختی تولیدکننده ترپن (مانند گونه‌های همیشه‌سبز) بسیار کمتر از ایزوپرن است. بیشینه آن‌ها در مرداد دیده می‌شود، اما در سایر ماه‌ها بسیار ناچیز یا غیرفعال است.

تحلیل زمانی انتشار ایزوپرن و مونوترپن در استان‌های شمالی

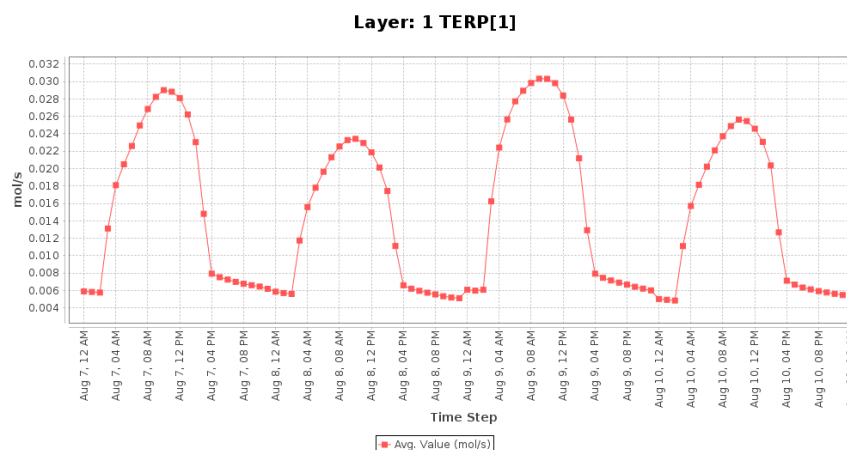
در استان‌های گیلان، مازندران و گلستان، نقشه‌های مکانی نشان‌دهنده تمرکز بالا و پراکندگی وسیع ایزوپرن در جنگل‌های هیرکانی هستند. بیشینه انتشار در مرداد دیده می‌شود، اما برخلاف یزد، انتشار در اردیبهشت و آبان نیز قابل توجه است که نشان‌دهنده پایداری شرایط فیزیولوژیکی برای تولید BVOCs در اقلیم معتدل و مرطوب شمال کشور است.

نمودارهای سری زمانی ارائه شده در شکل‌های ۱۱ تا ۱۴ نشان می‌دهند که ایزوپرن در سه فصل بهار،



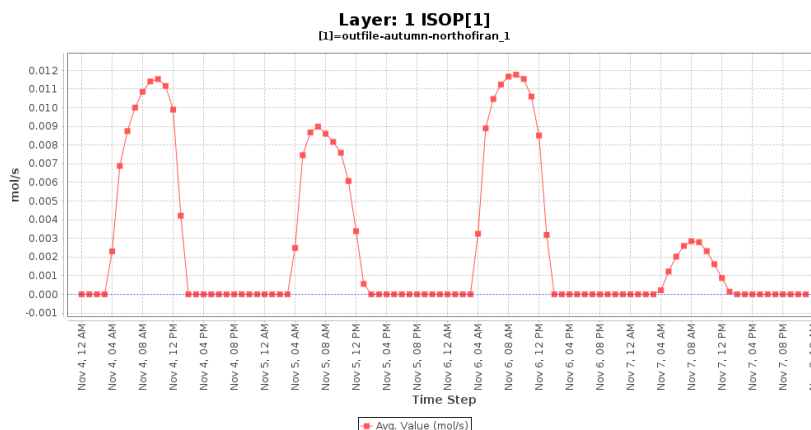
شکل ۱۱. نمودار سری زمانی انتشار ایزوپرن سه استان شمالی، می ۲۰۲۲ (اردیبهشت ۱۴۰۱)

مطابق شکل ۱۲، اوج فعالیت فتوسنتزی و پوشش کامل برگ‌ها باعث بیشینه شدن انتشار ایزوپرن می‌شود. دمای متعادل‌تر نسبت به یزد موجب بهینگی در ۷ شده و همراه با تراکم پوشش، مقادیر انتشار بسیار بالا ثبت می‌شوند. درختان پهن‌برگ هیرکانی سهم زیادی در این مقادیر دارند.



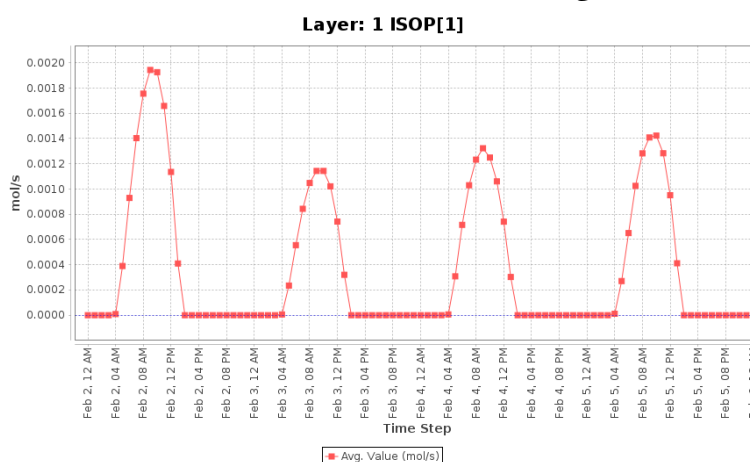
شکل ۱۲. نمودار سری زمانی انتشار ایزوپرن سه استان شمالی، اوت ۲۰۲۲ (مرداد ۱۴۰۱)

در فصل پاییز، برخلاف یزد که روندی کاهشی آغاز می‌شود، در شمال کشور نمودارها نشان‌دهنده یک قله دوم هستند (شکل ۱۳). جنگل‌های پهن‌برگ در این زمان هنوز فعال‌اند و برگ‌ها وارد مرحله بلوغ شده‌اند که در مدل MEGAN منجر به افزایش انتشار مونوترپن نیز می‌شود. برخلاف انتظار، مقادیر ایزوپرن در این ماه همچنان قابل توجه‌اند. علت آن حفظ فعالیت برگ‌های بالغ، تأخیر در ریزش برگ‌ها، و شرایط اقلیمی نسبتاً معتدل پاییز شمال ایران است.



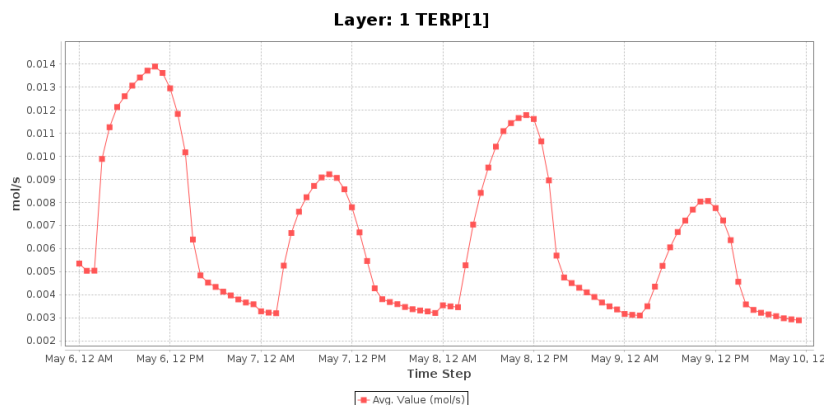
شکل ۱۳. نمودار سری زمانی انتشار ایزوپرن سه استان شمالی، نوامبر ۲۰۲۲ (آبان ۱۴۰۱)

هرچند نمودارها کاهش انتشار را نسبت به پاییز نشان می‌دهند (شکل ۱۴)، اما در شمال برخلاف یزد، مقدار انتشار در زمستان کاملاً صفر نمی‌شود. وجود گونه‌های همیشه‌سبز و برخی گونه‌های سوزنی‌برگ باعث می‌شود انتشار در برخی نواحی جنگلی ادامه یابد.



شکل ۱۴. نمودار سری زمانی انتشار ایزوپرن سه استان شمالی، فوریه ۲۰۲۳ (بهمن ۱۴۰۱)

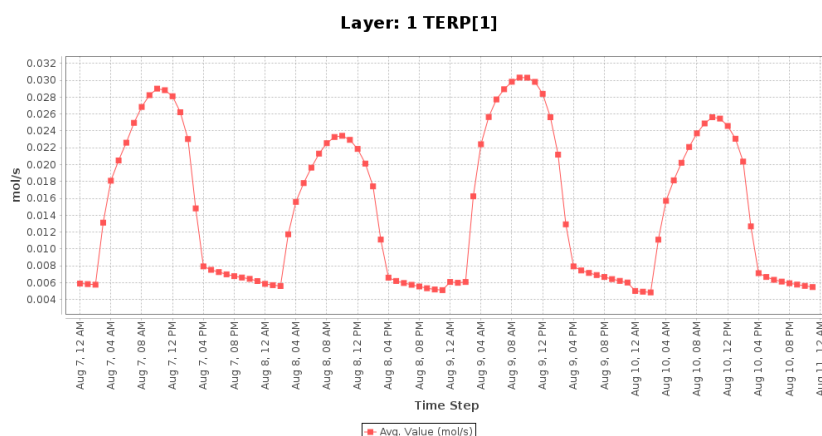
مونوترپن‌ها در استان‌های شمالی ایران نیز رفتار مشابهی دارند؛ اما برخلاف یزد، مقدار آن‌ها در آبان نسبت به اردیبهشت بیشتر است (شکل ۱۵ و شکل ۱۷). این ممکن است به دلیل حضور گونه‌های همیشه‌سبز و برگ‌های بالغ در پاییز باشد که انتشار ترپن را تقویت می‌کند. نمودارهای سری زمانی نشان‌دهنده حضور مستمر انتشار در کل سال هستند و پیک دوم قابل توجهی در آبان مشاهده می‌شود.



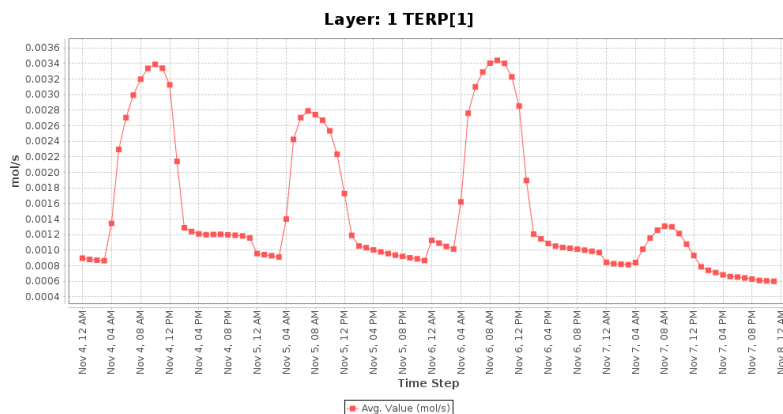
شکل ۱۵. نمودار سری زمانی انتشار مونوترپن سه استان شمالی، می ۲۰۲۲ (اردیبهشت ۱۴۰۱)

می‌تواند به تنوع گونه‌ای و سن بالای برگ‌ها در جنگل‌های شمال مرتبط باشد. این انتشار بالا، در برخی مناطق جنگلی مرطوب حتی تا سه برابر تابستان یزد گزارش شده است.

مطابق شکل ۱۶، فصل تابستان بیشینه انتشار در شمال ایران را نیز رقم می‌زند. نمودارها حاکی از افزایش شدید و یکنواخت ایزوپرن و ترپین‌ها هستند. برخلاف یزد، در شمال ترپین‌ها نیز سهم بالایی پیدا می‌کنند که



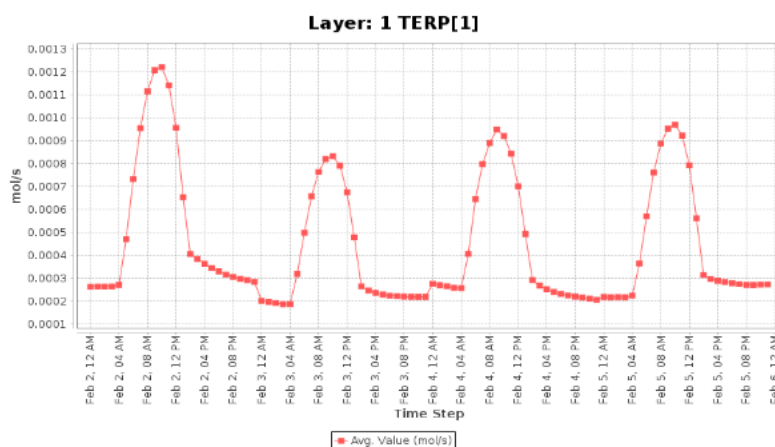
شکل ۱۶. نمودار سری زمانی انتشار مونوترپن سه استان شمالی، اوت ۲۰۲۲ (مرداد ۱۴۰۱)



شکل ۱۷. نمودار سری زمانی انتشار مونوترپن سه استان شمالی، نوامبر ۲۰۲۲ (آبان ۱۴۰۱)

(۲۰۱۲) هم‌خوانی دارد که انتشار مونوترپن‌ها را به فعالیت‌های بیوشیمیایی برگ‌های بالغ و ذخایر ترپنی مرتبط می‌داند. بنابراین، الگوی سالانه مونوترپن در شمال کشور از پیوستگی بیشتری نسبت به اقلیم خشک یزد برخوردار است.

بر اساس شکل ۱۸، در فصل زمستان نیز مقادیر انتشار مونوترپن در مناطق شمالی کشور به‌طور کامل متوقف نمی‌شود. وجود گونه‌های سوزنی‌برگ همیشه‌سبز، رطوبت بالا و ذخایر رزینی درختان بالغ موجب تداوم انتشار پایه‌ای حتی در دماهای پایین زمستانی می‌شود. این رفتار با یافته‌های گونتر و همکاران



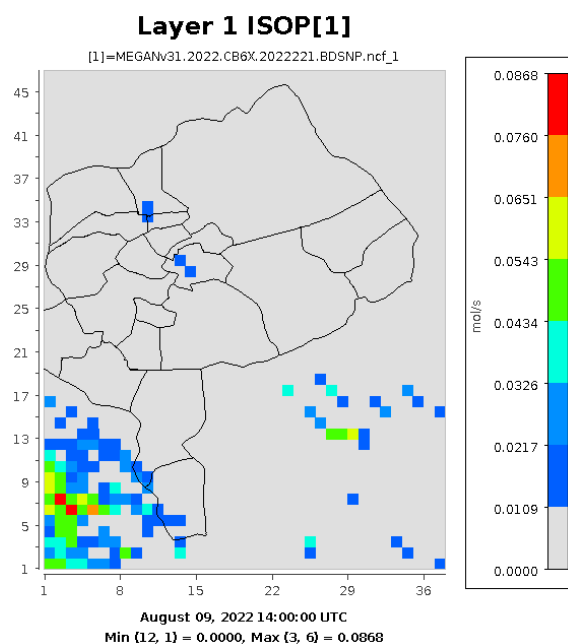
شکل ۱۸. نمودار سری زمانی انتشار مونوترپن سه استان شمالی، فوریه ۲۰۲۳ (بهمن ۱۴۰۱)

نقشه‌های مربوط به استان یزد در این روز نشان‌دهنده تمرکز محدود انتشار ایزوپرن و مونوترپن در نواحی دارای پوشش گیاهی، به‌ویژه اطراف شهر یزد و باغات پراکنده منطقه است. شدت انتشار ایزوپرن به‌مراتب بیشتر از مونوترپن بوده که این موضوع با سازوکار انتشار این ترکیبات نیز هماهنگ است (شکل ۱۹). افزایش دمای هوا، تابش شدید خورشید و رشد فعال گونه‌های پهن‌برگ مقاوم در فضاها سبز شهری موجب افزایش انتشار ایزوپرن شده است. در مقابل، انتشار مونوترپن محدودتر و بیشتر تحت تأثیر گونه‌های خاصی از درختان همیشه‌سبز بوده که در شرایط اقلیم گرم و خشک یزد قادر به ادامه فعالیت بیوشیمیایی هستند (شکل ۲۰).

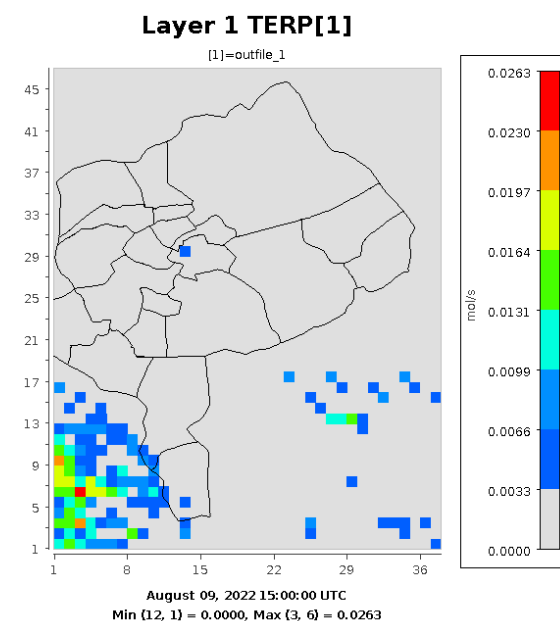
تحلیل نقشه‌های مکانی منتخب

به‌منظور بررسی دقیق‌تر الگوهای فضایی انتشار ترکیبات آلی فرار بیوژنیک در شرایط اقلیمی متفاوت، نقشه‌های حاصل از مدل MEGAN برای تاریخ ۱۸ مرداد ۱۴۰۱ (۹ اوت ۲۰۲۲) به‌منزله یک روز نماینده از دوره اوج انتشار انتخاب و تحلیل شدند. انتخاب این تاریخ براساس نتایج نمودارهای سری زمانی انجام شد که نشان دادند این بازه زمانی دارای بیشترین مقادیر انتشار در هر دو منطقه مورد مطالعه است. در ادامه، الگوی انتشار ایزوپرن و مونوترپن برای استان یزد و نواحی شمالی ایران در این روز مورد بحث قرار می‌گیرد.

نقشه‌های مربوط به استان یزد در تاریخ ۱۸ مرداد ۱۴۰۱ (۹ اوت ۲۰۲۲)



شکل ۱۹. نقشه انتشار ایزوپرن استان یزد، تاریخ ۹ اوت ۲۰۲۲ (۱۸ مرداد ۱۴۰۱)



شکل ۲۰. نقشه انتشار مونوترپن استان یزد، تاریخ ۹ اوت ۲۰۲۲ (۱۸ مرداد ۱۴۰۱)

نقشه‌های مربوط به استان‌های شمالی در تاریخ ۱۸ مرداد ۱۴۰۱ (۹ اوت ۲۰۲۲)

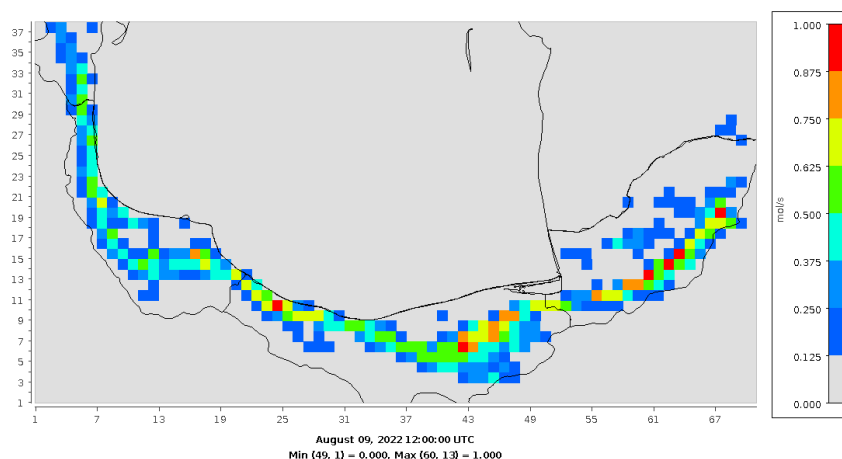
در نقشه‌های مربوط به استان‌های شمالی (گیلان، مازندران و گلستان)، الگوی فضایی انتشار، گسترده‌تر و یکنواخت‌تر است. مناطق با تراکم بالای پوشش جنگلی

پهن‌برگ هیرکانی می‌تواند سهم مهمی در انتشار ایزوپرن داشته باشد (شکل ۲۱)، چراکه این درختان در شرایط نوری و دمایی بالا، بیشترین نرخ انتشار ایزوپرن را دارند (گونتر و همکاران، ۱۹۹۵؛ آیدین و همکاران، ۲۰۱۴). این الگوها نشان می‌دهد که پوشش گیاهی گسترده، رطوبت بالا و دمای معتدل در شمال، شرایط

تنوع زیستی، شرایط فیزیولوژیکی و اقلیم کوهستانی، میزان انتشار ترین ها را افزایش می دهد (گونت و همکاران، ۲۰۱۲).

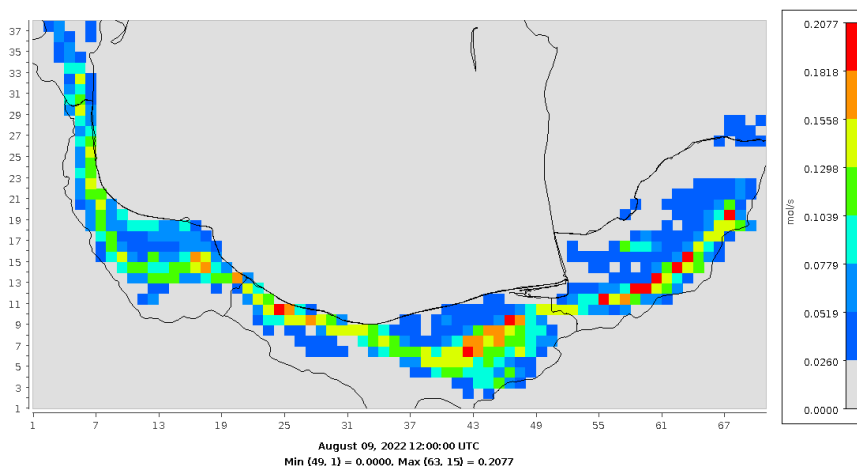
بسیار مساعدتری برای انتشار BVOCS فراهم کرده است. در مورد مونوترین نیز (شکل ۲۲)، نقش گونه های سوزنی برگ در افزایش انتشار این ترکیبات در مناطق جنگلی کاملاً مشهود است؛ به ویژه در ارتفاعات البرز که

Layer 1 ISOP[1]



شکل ۲۱. نقشه انتشار ایزوپرن سه استان شمالی، تاریخ ۹ اوت ۲۰۲۲ (۱۸ مرداد ۱۴۰۱)

Layer 1 TERP[1]



شکل ۲۲. نقشه انتشار مونوترین سه استان شمالی، تاریخ ۹ اوت ۲۰۲۲ (۱۸ مرداد ۱۴۰۱)

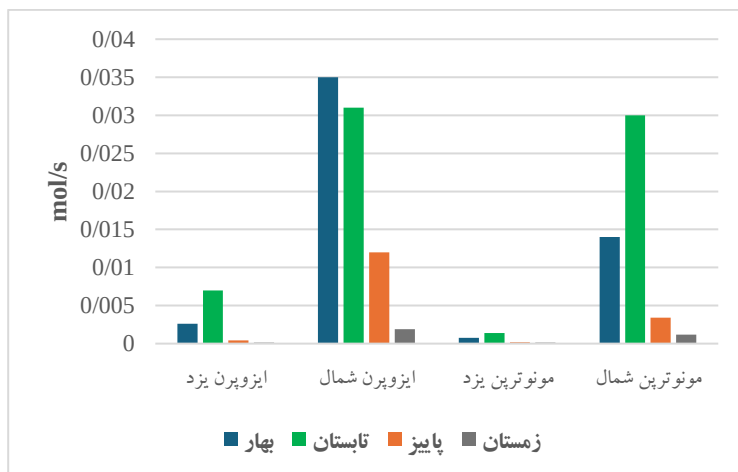
درحالی که مقدار متناظر آن در یزد حدود ۰/۰۰۷ مول بر ثانیه است. این موضوع بیانگر آن است که اقلیم مرطوب و پوشش گیاهی متراکم شمال شرایط زیستی و فیزیولوژیکی مناسب تری برای تولید ایزوپرن فراهم می کند. مونوترین نیز روند مشابهی دارد. بیشینه مقدار در شمال ۰/۰۳ مول بر ثانیه است، درحالی که در یزد مقدار انتشار تنها ۰/۰۰۱۴ مول بر ثانیه بوده است. حضور

مقایسه یزد و استان های شمالی ایران

شکل ۲۳ نشان می دهد که بیشینه انتشار در هر دو ترکیب (ایزوپرن و مونوترین) در تابستان رخ می دهد. بااین حال، میزان انتشار در استان های شمالی به طور قابل توجهی بیشتر از یزد است. مقدار انتشار ایزوپرن در شمال در تابستان به حدود ۰/۰۳۵ مول بر ثانیه می رسد،

در یزد به دلیل محدودیت پوشش برگ و شرایط اقلیمی خشک، انتشار تقریباً صفر است.

گونه‌های همیشه‌سبز سوزنی‌برگ در شمال و ذخیره رزین در ساختار درختان باعث می‌شود حتی در پاییز و زمستان نیز مقدار انتشار مونوترپن صفر نشود، در حالی که



شکل ۲۳. مقایسه فصلی بیشینه انتشار ایزوپرن و مونوترپن در دو منطقه اقلیمی (یزد و استان‌های شمالی ایران)

یافته‌ها

جدول ۱ مقایسه انتشار فصلی ایزوپرن و مونوترپن در دو منطقه یزد و استان‌های شمالی ایران را نشان می‌دهد. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که در هر دو منطقه، ایزوپرن سهم غالب انتشار را نسبت به مونوترپن داشت، اما اختلاف بین این دو ترکیب در یزد بیشتر از شمال بود. این موضوع بیانگر آن است که در اقلیم خشک، انتشار بیشتر تحت تأثیر نوسانات شدید دما و تابش قرار دارد، در حالی که در شمال ایران، به دلیل وجود پوشش گیاهی متراکم و گونه‌های همیشه‌سبز، انتشار هر دو ترکیب در طول سال پایدارتر باقی می‌ماند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بیشینه انتشار ایزوپرن در شمال ایران حدود ۵ برابر بیشتر از یزد است، در حالی که این اختلاف برای مونوترپن حدود ۲۱ برابر برآورد شد. از نظر زمانی، هر دو منطقه بیشترین انتشار را در تابستان تجربه کردند، اما شدت تغییرات فصلی در یزد بسیار بیشتر بود؛ به گونه‌ای که انتشار زمستانی تقریباً به صفر رسید، در حالی که در شمال حتی در زمستان نیز انتشار ادامه داشت. این نتایج نشان می‌دهد که علاوه بر مقدار انتشار، پایداری زمانی

انتشار نیز بین دو اقلیم متفاوت است. در اقلیم مرطوب، انتشار BVOCs در طول سال یکنواخت‌تر است، در حالی که در اقلیم خشک، انتشار عمدتاً به دوره‌های گرم سال محدود می‌شود. حضور گونه‌های همیشه‌سبز سوزنی‌برگ در شمال و ذخیره رزین در ساختار درختان باعث می‌شود حتی در پاییز و زمستان نیز مقدار انتشار مونوترپن صفر نشود، در حالی که در یزد به دلیل محدودیت پوشش برگ و شرایط اقلیمی خشک، انتشار تقریباً صفر است.

جدول ۱. مقایسه انتشار فصلی ایزوپرن و مونوترپن در دو منطقه اقلیمی (یزد و استان‌های شمالی ایران)

شاخص	یزد	شمال
انتشار غالب	ایزوپرن	ایزوپرن
بیشینه ایزوپرن (مول بر ثانیه)	۰.۰۰۷	۰.۰۳۵
بیشینه مونوترپن (مول بر ثانیه)	۰.۰۰۱۴	۰.۰۰۳
نسبت بیشینه ایزوپرن	۰.۲	۵
نسبت بیشینه مونوترپن	۰.۰۴	۲۱.۴
فصل بیشینه انتشار	تابستان	تابستان
فصل کمینه انتشار	زمستان	زمستان
دامنه تغییرات فصلی	زیاد	متوسط

خلاصه و نتیجه گیری

در این پژوهش با استفاده از مدل MEGAN، انتشار ایزوپرن و مونوترپن در دو اقلیم متفاوت ایران، یعنی اقلیم خشک (یزد) و اقلیم مرطوب (شمال ایران)، مورد بررسی قرار گرفت.

به طور خلاصه نشان داده شد که:

- اقلیم، نوع پوشش گیاهی و تنوع گونه‌ای نقش اساسی در میزان و الگوی انتشار BVOCs دارند.
- ایزوپرن بیشتر از گونه‌های پهن‌برگ در تابستان‌ها و مونوترپن از درختان سوزنی‌برگ در تمام فصول سال منتشر می‌شوند.
- استان‌های شمالی ایران به دلیل شرایط اقلیمی مساعدتر، سهم بیشتری در انتشار این ترکیبات دارد که می‌تواند بر تشکیل اوزون و ردسپهری و ذرات معلق ثانویه اثرگذار باشد.
- مدل MEGAN نشان داد که حتی در مناطق خشک با پوشش گیاهی محدود مانند یزد، دمای بالا در تابستان می‌تواند به اوج انتشار ایزوپرن منجر شود.
- انتشار مونوترپن در مناطق شمالی با تراکم سوزنی‌برگ‌ها نشان از اهمیت سن برگ، دمای هوا و شرایط فیزیولوژیکی دارد.
- این یافته‌ها با مطالعات پیشین هم‌راستا هستند که تأکید دارند تنوع گونه‌ای و دمای هوا دو عامل کلیدی در انتشار BVOCs هستند.

نتایج این پژوهش نشان داد که در شرایط اقلیمی ایران، نوع و تراکم پوشش گیاهی نسبت به دمای هوا نقش تعیین‌کننده‌تری در کنترل الگوی مکانی و زمانی انتشار BVOCs دارد. مقایسه بین یزد و شمال کشور

نشان داد که حتی در شرایط دمایی مشابه یا پایین‌تر، وجود جنگل‌های متراکم و مقادیر بالاتر LAI موجب افزایش چشمگیر انتشار ایزوپرن و مونوترپن می‌شود. همچنین نتایج بیانگر آن است که انتشار BVOCs در مناطق خشک و نیمه‌خشک دارای وابستگی فصلی شدید بوده و عمدتاً به ماه‌های گرم سال محدود می‌شود، درحالی‌که در مناطق مرطوب و جنگلی، انتشار در بخش قابل توجهی از سال تداوم دارد. این موضوع اهمیت پوشش گیاهی و شرایط زیست‌اقلیمی را در کنترل انتشار این ترکیبات تأیید می‌کند.

بنابراین، در برآورد سیاهه انتشار BVOCs برای ایران، استفاده هم‌زمان از اطلاعات اقلیمی و ویژگی‌های پوشش گیاهی ضروری است و اتکا به متغیرهای هواشناسی به تنهایی می‌تواند موجب برآورد نادرست انتشار شود و استفاده از مدل‌های مبتنی بر متغیرهایی مانند LAI، تابش خورشیدی و شرایط اقلیمی می‌تواند چارچوب مناسبی برای مطالعات آتی فراهم کند. باین حال، تعمیم نتایج به مقیاس ملی نیازمند بررسی مناطق اقلیمی بیشتر و انجام اعتبارسنجی‌های تکمیلی است.

از محدودیت‌های این پژوهش می‌توان به بررسی یک ساله دوره مطالعه اشاره کرد؛ بنابراین پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی، تغییرات بین‌سالی انتشار ترکیبات آلی فرار بیوژنیک نیز مورد بررسی قرار گیرد.

با توجه به نتایج تحقیق، برای سیاست‌گذاران محیط‌زیست و مدیران فضای سبز شهری توجه به کاشت گونه‌های درختی سازگار و با نرخ پایین انتشار BVOCs علاوه بر توجه به اقلیم منطقه مورد مدیریت پیشنهاد می‌شود.

منابع

امینی پارسا، و.، صالحی، ا. و یآوری، ا. ر. (۱۳۹۸). برآورد مقدار انتشار ترکیبات آلی فرار بیوژنیک به وسیله درختان شهری با استفاده

Guenther, A., Hewitt, C. N., Erickson, D., Fall, R., Geron, C., Graedel, T., ... & Zimmerman, P. (1995). A global model of natural volatile organic compound emissions. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 100(D5), 8873-8892.

Guenther, A. B., Jiang, X., Heald, C. L., Sakulyanontvittaya, T., Duhl, T., Emmons, L. K., & Wang, X. (2012). The Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature version 2.1 (MEGAN2. 1): an extended and updated framework for modeling biogenic emissions. *Geoscientific Model Development*, 5(6), 1471-1492.

Guenther, A., Karl, T., Harley, P., Wiedinmyer, C., Palmer, P. I., & Geron, C. (2006). Estimates of global terrestrial isoprene emissions using MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature). *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6(11), 3181-3210.

Guenther, A. B., Zimmerman, P. R., Harley, P. C., Monson, R. K., & Fall, R. (1993). Isoprene and monoterpene emission rate variability: model evaluations and sensitivity analyses. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 98(D7), 12609-12617.

Heald, C. L., Wilkinson, M. J., Monson, R. K., Alo, C. A., Wang, G., & Guenther, A. (2009). Response of isoprene emission to ambient CO₂ changes and implications for global budgets. *Global Change Biology*, 15(5), 1127-1140.

Khedive, E., Shirvany, A., Assareh, M. H., & Sharkey, T. D. (2017). In situ emission of BVOCs by three urban woody species. *Urban Forestry & Urban Greening*, 21, 153-157.

Lun, X., Lin, Y., Chai, F., Fan, C., Li, H., & Liu, J. (2020). Reviews of emission of biogenic volatile organic compounds (BVOCs) in Asia. *Journal of Environmental Sciences*, 95, 266-277.

Matsunaga, S. N., Shimada, K., Masuda, T., Hoshi, J., Sato, S., Nagashima, H., & Ueno, H. (2017). Emission of biogenic Volatile Organic compounds from trees along streets and in Urban Parks in Tokyo, Japan. *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 11(1), 29-32.

Nowak, D. J., Crane, D. E., & Stevens, J. C. (2006). Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States. *Urban forestry & urban greening*, 4(3-4), 115-123.

Nowak, D. J., Hirabayashi, S., Doyle, M., McGovern, M., & Pasher, J. (2018). Air pollution removal by urban forests in Canada and its effect on air quality and human health. *Urban For. Urban Green*, 29, 40-48.

Nowak, D. J., & Crane, D. E. (2002). Carbon storage and sequestration by urban trees in the USA. *Environmental pollution*, 116(3), 381-389.

Oumami, S., Arteta, J., Guidard, V., Tulet, P., & Hamer, P. D. (2024). Evaluation of isoprene emissions from the coupled model SURFEX-MEGANv2. 1. *Geoscientific Model Development*, 17(8), 3385-3408.

از مدل i-Tree Eco بررسی موردی: شهر تبریز. فصلنامه علمی پژوهش و توسعه جنگل، ۵ (۳)، ۳۷۱-۳۵۷.

مرکز آمار ایران (۱۳۹۵). سرشماری عمومی نفوس و مسکن. سازمان برنامه و بودجه کشور.

Aydin, Y. M., Yaman, B., Koca, H., Dasdemir, O., Kara, M., Altioğ, H., ... & Elbir, T. (2014). Biogenic volatile organic compound (BVOC) emissions from forested areas in Turkey: Determination of specific emission rates for thirty-one tree species. *Science of the Total Environment*, 490, 239-253.

Cai, B., Cheng, H., Kang, T., Wang, Y., Han, W., & Wang, W. (2025). The input-optimized and supplemented MEGAN improves biogenic volatile organic compounds estimation accuracy in China. *Atmospheric Pollution Research*, 102650.

Chameides, W. L., Lindsay, R. W., Richardson, J., & Kiang, C. S. (1988). The role of biogenic hydrocarbons in urban photochemical smog: Atlanta as a case study. *Science*, 241(4872), 1473-1475.

Curtis, A. J., Helmig, D., Baroch, C., Daly, R., & Davis, S. (2014). Biogenic volatile organic compound emissions from nine tree species used in an urban tree-planting program. *Atmospheric Environment*, 95, 634-643.

Escobedo, F. J., Kroeger, T., & Wagner, J. E. (2011). Urban forests and pollution mitigation: Analyzing ecosystem services and disservices. *Environmental pollution*, 159(8-9), 2078-2087.

Fitzky, A. C., Sandén, H., Karl, T., Fares, S., Calfapietra, C., Grote, R., ... & Rewald, B. (2019). The interplay between ozone and urban vegetation—BVOC emissions, ozone deposition, and tree ecophysiology. *Frontiers in Forests and Global Change*, 2, 50.

Geron, C. D., Guenther, A. B., & Pierce, T. E. (1994). An improved model for estimating emissions of volatile organic compounds from forests in the eastern United States. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 99(D6), 12773-12791.

Guenther, A., Baugh, B., Brasseur, G., Greenberg, J., Harley, P., Klinger, L., ... & Vierling, L. (1999). Isoprene emission estimates and uncertainties for the Central African EXPRESSO study domain. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 104(D23), 30625-30639.

Guenther, A. (2013). Biological and chemical diversity of biogenic volatile organic emissions into the atmosphere. *International Scholarly Research Notices*, 2013(1), 786290.

Guenther, A., Geron, C., Pierce, T., Lamb, B., Harley, P., & Fall, R. (2000). Natural emissions of non-methane volatile organic compounds, carbon monoxide, and oxides of nitrogen from North America. *Atmospheric Environment*, 34(12-14), 2205-2230.

U.S. EPA. (2017). i-Tree Eco v6 User's Manual. United States Environmental Protection Agency, Washington, D.C., USA.

WHO (2006). Who Air Quality Guidelines for Particulate Matter, Ozone, Nitrogen Dioxide and Sulfur Dioxide: Global Update 2005: Summary of Risk Assessment.

Yousoufpour, Y., Abolhassani, L., Hirabayashi, S., Burgess, D., Sabouni, M. S., & Daneshvarkakhki, M. (2024). Ecosystem services and economic values provided by urban park trees in the air polluted city of Mashhad. *Sustainable Cities and Society*, 101, 105110.

Panji, N. S., McGlynn, D. F., Barry, L. E., Scanlon, T. M., Lerdau, M. T., Pusede, S. E., & Isaacman-VanWertz, G. (2024). Constraining light dependency in modeled emissions through comparison to observed biogenic volatile organic compound (BVOC) concentrations in a southeastern US forest. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 24(21), 12495-12507.

Pierce, T., Geron, C., Bender, L., Dennis, R., Tonnesen, G., & Guenther, A. (1998). Influence of increased isoprene emissions on regional ozone modeling. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 103(D19), 25611-25629.

Comparison of Biogenic Volatile Organic Compounds (BVOCs) Emissions in Northern Iran and Yazd Province Using the MEGAN Model

Yeganeh Yousofpour¹, Khosro Ashrafi^{2*}, Alireza Pardakhti³, Amirhoushang Ehsani⁴

¹ PhD Candidate, Department of Environmental Engineering, Kish International Campus, University of Tehran, Kish, Iran

² Professor (Corresponding Author), Department of Environmental Engineering, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran

³ Associate Professor, Department of Environmental Engineering, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran

⁴ Associate Professor, , Department of Environmental Design Engineering, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran

*Corresponding Author Email: khashrafi@ut.ac.ir

Received: 8 November 2025, Accepted: 12 July 2026

ABSTRACT

Biogenic volatile organic compounds (BVOCs) are naturally emitted substances that play a significant role in atmospheric photochemical reactions, contributing to the formation of pollutants such as ozone and secondary particulate matter. Understanding the emission rates of these compounds under varying climatic conditions—particularly in regions with diverse vegetation cover—is crucial for evaluating their impact on air quality. This study aimed to compare the emission of isoprene, one of the most significant BVOCs, in two climatically distinct regions of Iran: the humid north and the arid province of Yazd. The MEGAN model was used to estimate emissions, incorporating summer data for leaf area index (LAI), air temperature, solar radiation, and vegetation types. The results showed that in northern Iran, due to denser vegetation, a higher abundance of broadleaf species, and a milder climate, the maximum emission rates of isoprene and monoterpene were on average 5 to 21 times higher than in Yazd province. These findings highlight the direct influence of meteorological factors and vegetation structure on BVOC emissions and emphasize the importance of their consideration in the environmental management of urban green spaces and air pollution control policies.

Keywords: Vegetation cover, BVOCs, Leaf Area Index (LAI), Isoprene emission, Air quality

HOW TO CITE THIS ARTICLE?

Yousofpour, Y., Ashrafi, K., Pardakhti, A., & Ehsani, A. (2026). Comparison of Biogenic Volatile Organic Compounds (BVOCs) Emissions in Northern Iran and Yazd Province Using the MEGAN Model. *Journal of Meteorology and Atmospheric Science*, 8(2), 66-91. <https://doi.org/Journal of Meteorology and Atmospheric Science>.

COPYRIGHTS

Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted to the JMAS Journal. This is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

