



## ارزیابی اثرات آتش‌سوزی بر آلودگی منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی؛ فراتحلیلی بر مطالعات موجود

بابک امیدوار<sup>۱</sup> ، رامین سماواتی<sup>۲</sup>، مهسا محمدرضاییک<sup>۳</sup>

۱. استاد، گروه مهندسی سوانح، آموزش و سیستم‌های محیط زیست، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران. نویسنده مسئول: bomidvar@ut.ac.ir
۲. دانشجوی دکترا، محیط زیست منابع آب، پردیس بین‌المللی کیش دانشگاه تهران، کیش، ایران.
۳. دانشجوی دکترا، مهندسی در سوانح طبیعی، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخ‌ها: دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۱۴ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۰۷	افزایش فراوانی آتش‌سوزی در سطح جهان، پیامدهای جدی بر سلامت انسان و محیط‌زیست به ویژه کیفیت آب داشته‌است. ورود خاکستر، رسوبات و آلاینده‌های حاصل از سوختن پوشش گیاهی و مناطق شهری به پیکره آبی، تهدیدی جدی برای آب آشامیدنی و زیستگاه آبی محسوب می‌شود. هدف این تحقیق، بررسی انواع آلاینده‌های ناشی از آتش‌سوزی، نحوه ورود و خروج آلاینده به منابع آب سطحی و زیرزمینی و ارزیابی کمی اثرات آن‌ها، بر اساس فراتحلیل مطالعات موجود است. این پژوهش از نوع کاربردی و با روش توصیفی و فراتحلیل انجام شده‌است. نتایج نشان داد که پس از آتش‌سوزی، غلظت آلاینده‌های فیزیکی در منابع آبی افزایش یافته و مقادیر شیمیایی واکنش‌های متغیری را داشته‌اند، بگونه‌ای که غلظت آلاینده‌ها برای ادامه زندگی آبزیان یا کاربرد آب آشامیدنی از حدود قابل قبول فراتر رفته و مجموعه‌های بیولوژیکی در محیط آبی معمولاً دچار خطرات جدی شده‌اند. همچنین یافته‌ها نشان داد، زمان تداوم تأثیر اکثر آلاینده‌ها بر نقاط پایانی، کمتر از ۵ سال بوده اما در برخی موارد تا ۱۵ سال یا بیشتر هم ادامه یافته‌است. همچنین یک مدل مفهومی برای ارزیابی اثرات آتش‌سوزی، بر کیفیت آب و پاسخ نقاط پایانی، ارائه شد. این پژوهش منبعی راهبردی برای مدیران محیط زیست جهت درک تأثیر آتش‌سوزی بر حوضه‌های آبخیز است و همچنین چارچوبی راهبردی برای مطالعات آتی سایر محققان فراهم می‌کند.
واژگان کلیدی: آتش‌سوزی آلاینده‌های بیولوژیکی آلاینده‌های شیمیایی آلاینده‌های فیزیکی حوضه آبخیز	

استناد: امیدوار، بابک، سماواتی، رامین، محمدرضاییک، مهسا (۱۴۰۴). ارزیابی اثرات آتش‌سوزی بر آلودگی منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی؛ فراتحلیلی بر مطالعات موجود. *رویکردهای نو در مطالعات انسان و محیط*، ۲(۲)، ۱۸۱-۱۵۹.

<https://doi.org/10.30487/hmes.2025.2045898.1069>

© ۱۴۰۴ (۲۰۲۶) نویسندگان مقاله، نشریه رویکردهای نو در مطالعات انسان و محیط، ناشر: سازمان مطالعه و تدوین کتب دانشگاهی در علوم اسلامی و انسانی (سمت).



# Innovative Approaches in Human – Environment Studies




Vol. 2, Issue 2

Autumn & Winter 2026

Online ISSN: 2821-1812

## Assessment of wildfire consequences on the quality of surface and underground endpoints of the water resources – A meta analyses of the available studies

Babak Omidvar <sup>1</sup> , Ramin Samavati <sup>2</sup>, Mahsa Mohammadreza beyk <sup>3</sup>

1. Professor, Department of Disaster Engineering, Education and Environmental Systems, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran. Corresponding author: bomidvar@ut.ac.ir
2. Ph.D. Candidate, Water Resources Environment, Kish International Campus, University of Tehran, Kish, Iran.
3. Ph.D. Candidate, Natural Disaster Engineering, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran.

### Article Info

#### History

Received: September 05, 2025

Accepted: December 28, 2025

#### Keywords

Wild Fire  
biological pollutants  
chemical pollutants  
physical pollutants  
Watershed

### Abstract

The increase in the frequency of fires worldwide has had serious consequences for human health and the environment, especially water quality. The entry of ash, sediments, and pollutants from burning vegetation and urban areas into water bodies is a serious threat to drinking water and aquatic habitats. The aim of this research is to investigate the types of pollutants resulting from fires, the way pollutants enter and exit surface and groundwater resources, and quantitatively assess their effects, based on a meta-analysis of existing studies. This research is of an applied type and was conducted using a descriptive and meta-analysis method. The results showed that after fires, the concentration of physical pollutants in water resources increased and the chemical values had variable reactions, such that the concentration of pollutants exceeded acceptable limits for the continuation of aquatic life or the use of drinking water, and biological communities in the aquatic environment usually faced serious risks. The findings also showed that the duration of the impact of most pollutants on the endpoints was less than 5 years, but in some cases it continued for 15 years or more. A conceptual model was also presented to assess the effects of fire on water quality and endpoint response. This study is a strategic resource for environmental managers to understand the impact of fire on watersheds and also provides a strategic framework for future studies by other researchers.

**Citation:** Omidvar, B., Samavati, R., & Mohammad reza beyk, M. (2025). Assessment of wildfire consequences on the quality of surface and underground endpoints of the water resources – A meta analyses of the available studies. *Innovative Approaches in Human–Environment Studies*, 2(2), 159-181.

<https://doi.org/10.30487/hmes.2025.2045898.1069>

© 2025 Authors, Innovative Approaches in Human–Environment Studies.

**Publisher:** The Organization for Researching and Composing University Textbooks in the Islamic Science and Humanities (SAMT)

## مقدمه

بحران آب که به کاهش قابل توجه کیفیت و کمیت آب تعریف می‌شود؛ بر اساس گزارش مجمع اقتصاد جهانی (WEF)<sup>۱</sup> در سال ۲۰۱۵، در راس فهرست خطرات جهانی قرار داشته و بیشترین تأثیر بالقوه را بر جوامع دارد (نونس<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۱۸: ۴۶۳).

افزایش فرکانس آتش سوزی در دهه‌های اخیر، تأثیر زیادی بر سلامت انسان و کیفیت محیطی داشته‌است. آتش سوزی نه تنها به کیفیت هوا، زیرساخت‌ها، مناظر و منابع آبی آسیب می‌رساند بلکه چالش‌هایی برای تامین آب آشامیدنی، تفریح و زیستگاه‌های آبی به وجود می‌آورد (پائول<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۲۲: ۳۰۶۹۹). همچنین آتش سوزی، پوشش گیاهی و لایه بستر خاک را به شدت در برابر بارندگی آسیب‌پذیر می‌کند. بنابراین در پی تغییرات ناشی از آتش سوزی‌ها در خاک سطحی از جمله دفع آب توسط خاک و کاهش پایداری سنگدانه‌ها، رواناب سطحی و انتقال رسوب به منابع آبی در منطقه افزایش می‌یابد (شکل ۱) (بری<sup>۴</sup> و همکاران، ۲۰۲۱: ۱۶۴۵).

اگرچه اکوسیستم‌های گیاهی، آب پاک را تأمین می‌کنند، اما این مناطق همواره با آتش سوزی تهدید می‌شوند، در پی این روند محیط‌های آبی واقع در پایین دست منطقه سوخته، از آتش متأثر شده و امنیت تأمین آب در خطر خواهد بود (باسو<sup>۵</sup> و همکاران، ۲۰۲۲: ۲۵). بسیاری از ترکیبات موجود در آب‌های تحت تأثیر آتش سوزی، سرطان‌زا هستند. قرار گرفتن در معرض یا خوردن این ترکیبات می‌تواند برای سلامت انسان به ویژه برای نوزادان و سالخورده‌گان مضر باشد (استفنز<sup>۶</sup> و همکاران، ۲۰۲۱: ۸۱۰۰۴).

آتش سوزی تجویز شده در مناطق مستعد آتش سوزی، یک انتخاب کم هزینه برای مدیریت مناطق طبیعی است که بر بسیاری از ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک منطقه تأثیر می‌گذارد (آبراهام<sup>۷</sup> و همکاران، ۲۰۱۸: ۱۰۲۲). با وجود اهمیت شناخت تأثیر آتش بر منابع آبی، پژوهش‌چندانی در این زمینه انجام نشده و مدیران معمولاً به اطلاعات و ارزیابی‌های لازم از این مخاطره در زمان وقوع بحران دسترسی ندارند. بنابراین در این پژوهش بر اساس فراتحلیل مطالعات موجود مؤلفه‌های تأثیر گذار در آلودگی ناشی از آتش سوزی در یک حوضه آبخیز شناسایی و نحوه ورود این آلاینده‌ها به پیکره آبی بیان شده‌است. سپس انواع آلاینده‌ها مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته‌اند. بدین ترتیب بعد از بررسی و تحلیل مطالعات متعدد، راهکار مناسبی برای بررسی و ارزیابی اثرات آتش بر منابع آبی حوضه در یک منطقه مستعد آتش سوزی شناسایی و معرفی شده‌است.

پیش‌بینی می‌شود که این بررسی به مجریان مدیریت کیفیت آب، کمک کند تا اثرات احتمالی آتش سوزی را درک کرده و در طراحی استراتژی‌ها و سیاست‌های کاهش و بازیابی موثر باشد. برای محققان، این بررسی وضعیت دانش فعلی را برجسته و چارچوبی راهبردی برای تحقیقات آینده معرفی می‌کند.

## پیشینه تحقیق

تحقیقات هیدرولوژیکی زیادی در مورد اثرات آتش سوزی بر روی خاک، شیب تپه و تا حدی فرآیندهای حوضه آبریز با تمرکز بر نفوذ، رواناب، فرسایش و بازده آب انجام شده‌است که در ادامه به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود.

1. World Economic Forum
2. Nunes
3. Paul
4. Brey
5. Basso
6. Stephens
7. Abraham

ابراهام<sup>۱</sup> و همکارانش (2018) در مقاله‌ی "خطر تجمع فلزات پس از آتش‌سوزی در منابع آب سطحی"، با در نظر گرفتن نوسانات اقلیمی و افزایش وقوع آتش‌سوزی‌ها در مناطق طبیعی، به بررسی خطر تجمع فلزات پس از آتش‌سوزی در منابع آب سطحی پرداخته‌اند تا مورد تهیه برنامه‌ها و سیاست‌های مدیریتی مناسب در حین و پس از حوادث آتش‌سوزی به منظور حفظ کیفیت آب آشامیدنی شیوه‌ای کم هزینه فراهم شود (آبراهام و همکاران، ۲۰۱۸: ۱۰۲۲).

بلادن و همکارانش (۲۰۱۴) در مقاله‌ی "آتش‌سوزی جنگلی و آینده تأمین آب" به بیان پیامدهای آتش‌سوزی جنگلی بر بسیاری از مصارف آب پایین دست به ویژه تأمین آب آشامیدنی سالم، که ممکن است به زیرساخت‌های اضافی جهت تصفیه و افزایش عملیات و هزینه‌های نگهداری نیاز داشته باشد، پرداخته‌اند. آن‌ها به شناخت مناسبی از اثرات آتش‌سوزی بر حوضه‌های آبخیز دست یافتند و برای حفاظت از منابع آب جهانی که از محیط‌های جنگلی سرچشمه می‌گیرند، به توسعه استراتژی‌های سازگاری و کاهش موثر، اقدام نموده‌اند (بلادن<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۰۸: 2359).

بلادن و همکارانش، در تحقیقی دیگر، اشکال مختلف نیتروژن وارد شده به آبراه‌های حوضه آبخیز پس از آتش‌سوزی سال ۲۰۰۳ در کوه‌های راکی جنوب غربی آلبرتا را به مدت سه سال، مطالعه کرده‌اند. نتایج حاصل از مطالعات آن‌ها نشان می‌دهد که در این مدت غلظت نترات در حوضه سوخته شده شش و نیم برابر حد مرجع، غلظت نیتروژن آلی محلول (DON)<sup>۳</sup> چهار و یک دهم حد مرجع و نیتروژن کل (TN)<sup>۴</sup> پنج و سه دهم برابر حد مرجع برآورد شد، البته تغییرات غلظت آمونیوم در این حوضه کمتر بوده‌است. نکته قابل توجه در تحقیقات آن‌ها، وجود این آلاینده‌ها ناشی از ذوب برف حتی پس از گذشت سه سال از آتش‌سوزی بود (بلادن و همکاران، ۲۰۱۴).

کمپس و همکارانش (۲۰۱۶) مطالعه‌ای را با هدف ارزیابی نقش آتش‌سوزی در انتشار عناصر کمیاب و بررسی توزیع مجدد آن‌ها با گذشت زمان آتش‌سوزی انجام دادند. برای این منظور، این محققین عناصر وادیموم، منگنز، کوبالت، نیکل، مس، کادمیوم و سرب را در نمونه‌های خاک و خاکستر جمع‌آوری شده پس از آتش‌سوزی جنگلی در شمال مرکزی پرتغال در چهار بازه زمانی (اول بلافاصله پس از آتش‌سوزی سپس در بازه‌های زمانی چهار، هشت و پانزده ماه پس از سانحه) بررسی کردند. به طور کلی تحقیقات آن‌ها نقش آتش‌سوزی جنگلی را در افزایش سطوح عناصر اصلی و کمیاب در خاکستر و خاک سطحی مزارع، نشان داد و اهمیت تجمع آن‌ها در سال اول پس از آتش‌سوزی را برجسته کرد (کمپس<sup>۵</sup> و همکاران، ۲۰۱۶: ۱۳۶۳).

فرریرا<sup>۶</sup> و همکارانش در مقاله‌ی "فرآیندهای تخریب خاک و آب در مناطق سوخته"، بازتاب محدودیت‌های برخی از روش‌ها و تکنیک‌های ارزیابی را بررسی می‌کنند. که این روش‌ها برای ارزیابی فرسایش و پاسخ‌های هیدرولوژیکی پس از آتش‌سوزی تا سال ۲۰۰۸ استفاده می‌شده‌اند و اهمیت آن‌ها را در مقیاس‌های مختلف تحلیل می‌کند (فرریرا<sup>۷</sup> و همکاران، ۲۰۰۸: ۲۷۳).

کیان<sup>۸</sup> و همکارانش جریان زباله‌ای در مناطق سوخته شیب‌دار در جنوب کالیفرنیا در سال ۲۰۱۱ را بررسی کردند تا کنترل‌های هیدرولوژیکی بهتری را در زمان شروع بارندگی انجام دهند. برای نیل به این منظور آن‌ها بزرگی جریان زباله پس از آتش‌سوزی، فشار سیال منفذی بستر کانال و رطوبت خاک را همراه با شیب تپه در ۲۴ نقطه که در پنج

1. Abraham
2. Bladon
3. Dissolved Organic Nitrogen
4. Total Nitrogen
5. Campos
6. Ferreira
7. Ferreira
8. Kean

حوضه مختلف پس از آتش‌سوزی ۲۰۰۹ در جیسیتا<sup>۱</sup> (کوه‌های سن گابریل<sup>۲</sup> و سانتاینز<sup>۳</sup>) سوزانده شده‌اند، را ثبت کردند. این اندازه‌گیری‌ها تفاوت قابل توجهی در دینامیک جریان زباله بین سایت‌ها و رویدادهای متوالی در همان مکان را نشان داد. علی‌رغم این تفاوت‌ها، زمان و بزرگی همه رویدادها به طور مداوم در مدت زمان کوتاه (کمتر از ۳۰ دقیقه) با اوج و شدت بارندگی ارتباط مستقیم داشت و شاخص حجم جریان زباله نیز بهترین همبستگی را با شدت بارندگی کوتاه مدت نشان داد (کیان<sup>۴</sup> و همکاران، ۲۰۱۱: ۱۱۶).

لانگنز و همکارانش با درک این موضوع که نرخ فرسایش، پس از آتش‌سوزی تا سه مرتبه بزرگ‌تر از فرسایش پیش از آن خواهد بود و همچنین شدت سوختگی در منطقه، اغلب ناهمگن است، حجم جریان زباله ناشی از یک آتش‌سوزی جنگلی در مرکز ویکتوریا در استرالیا را در سال ۲۰۱۶ مدل کردند. این مدل تجربی، با بهره‌گرفتن از مدل گسترش آتش با استفاده از داده‌های تاریخی در مورد آب و هوا و احتمال اشتعال برای حوضه مورد مطالعه براساس تجربیات متخصصین درباره انتقال رسوب در منطقه و با فرضیات ساده و مبتنی بر شبیه‌سازی مونت کارلو، محاسبه شد. همچنین آن‌ها به کمک آنالیز شروع جریان واریزه با شاخص‌های رواناب سطحی و فرسایش‌پذیری سطح خاک، مدل‌سازی را انجام دادند (لانگنز<sup>۵</sup> و همکاران، ۲۰۱۶: ۴۰۷).

تحقیقات منسپیل‌ها و همکارانش (۲۰۱۴) نشان داد که آتش‌سوزی‌ها در مناطق طبیعی، موجب ایجاد آلودگی از نوع هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای (PAHs)<sup>۶</sup> در آب‌های زیرزمینی می‌شوند. آن‌ها با ارزیابی اثرات انتشار این نوع آلودگی بر کیفیت آب، معیارهای تصمیم‌گیری علمی برای شیوه‌های مدیریت جنگل پس از آتش‌سوزی را فراهم کردند. آلایندگی‌های آلی چون هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای که در طی آتش‌سوزی تولید می‌شوند، برای انسان سرطان‌زا است و بر بقا، رشد و تولید مثل بسیاری از گونه‌های آبی تأثیر منفی می‌گذارند (منسیلها<sup>۷</sup> و همکاران، ۲۰۱۴: ۸۰۶).

مودی و همکارانش (۲۰۱۳) بانک اطلاعات موجود درباره اثرات ناشی از آتش‌سوزی‌ها با ۷۰ سال سابقه تاریخی در مناطق طبیعی در آمریکا را بررسی کردند که دست‌آوردهای زیر را دربرداشت (مودی<sup>۸</sup> و همکاران، ۲۰۱۳: ۱۰):

۱. آن‌ها به سازماندهی و ترکیب شباهت‌ها و تفاوت‌ها در واکنش‌های پس از آتش‌سوزی در مناطق مختلف سوخته‌شده در جهان پرداخته‌اند و برای دستیابی به این منظور، الگوهای مشترک و کلیاتی را تعیین کردند که می‌توانند روابط علت و معلولی را توضیح دهند.

۲. روابط عملکردی بین معیارهای اثرات آتش‌سوزی و خواص هیدرولیکی خاک را شناسایی و کمیت آن را بیان کردند تا شرایط دینامیکی و گذرا پس از آتش‌سوزی را بهتر نشان دهند.

۳. بین مناظر سوخته و مقدار بارش که اغلب محرک اصلی رواناب پس از آتش‌سوزی است و واکنش‌های فرسایشی که بدنبال آن رخ می‌دهند در مقیاس متوسط زمانی و با در نظر گرفتن متغیر مکانی، تعامل برقرار کردند.

نریس و همکارانش (۲۰۱۷) تحقیقی را منتشر کردند که برای اولین بار از مدل پروژه پیش‌بینی فرسایش آب، برای پیش‌بینی رویدادهای فرسایش و رواناب در خاک‌های آتشفشانی متأثر از آتش در اروپا استفاده کرده‌است. برای این مدل‌سازی دو منطقه تحت تأثیر آتش‌سوزی‌های جنگلی در سال ۲۰۱۵ در تنریف<sup>۹</sup> (اسپانیا) انتخاب شد که شدت

1. Jesusita  
2. San Gabriel  
3. Santa Ynez  
4. Kean  
5. Langhans  
6. Polycyclic aromatic hydrocarbons  
7. Mansilha  
8. Moody  
9. Tenerife

سوختگی در آن در سطح متوسط خاک بر آورد شده بود و شرایط آب و هوایی (میانگین بارندگی سالانه به ترتیب ۷۵۰ و ۲۱۰ میلی متر) در نظر گرفته شد (نریس<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۷: ۱۸۸۴۵).

نونس و همکارانش (۲۰۱۶) با معرفی یک مدل ساده هیدرولوژیکی که دفع آب خاک را توصیف می کرد و از مقایسه داده های استخراج شده از یک مزرعه اکالیپتوس نسوخته با دو مزرعه اکالیپتوس سوزانده شده در شمال پرتغال بدست آمد، توانستند چرخه های فصلی آب گریزی خاک را نشان دهند. نتایج حاصل از تحقیقات آنها نشان داد که حتی یک رویکرد ساده برای شبیه سازی دفع آب خاک می تواند عملکرد مدل های هیدرولوژیکی را در جنگل های اکالیپتوس به ویژه پس از آتش سوزی به طور قابل توجهی تحت تأثیر قرار دهد (نونس<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۱۶: ۴۶۳).

در راستای گزارش های متعددی که درباره ارتباط بین سیل های ناگهانی<sup>۳</sup>، سیلاب های گل<sup>۴</sup> و لغزش های زمین<sup>۵</sup> در مناظر سوخته جنوب شرقی استرالیا با جریان های زباله پس از سال ۲۰۰۰ منتشر شده، نیمن<sup>۶</sup> و همکارانش تحقیقاتی را ارائه کردند که مستندی سیستماتیک از رویدادهای فرسایشی بزرگ پس از آتش سوزی جنگلی در جنوب شرقی استرالیا را نشان می دهد. این تحقیق با تمرکز بر حوضه های آبریز کوچک (> ۵ کیلومتر مربع) در شرق ویکتوریا که بین سال های ۲۰۰۳ و ۲۰۰۹ توسط آتش سوزی های جنگلی سوخته بودند، انجام پذیرفت و به اهدافی چون تعیین میزان فرسایش ناشی از جریان زباله، شناسایی آستانه های بارندگی و ویژگی های هیدرولوژیکی کلیدی در منطقه مورد مطالعه دست یافتند. نتایج این تحقیق نشان داد که منشأ سیزده مورد از شانزده رویداد فرسایشی بررسی شده، جریان های زباله های ناشی از رواناب بودند. بنابراین بر اساس یافته های آنها، جریان های زباله های تولید شده از رواناب در جنگل های اکالیپتوس خشک، فرآیند مهمی تلقی شده اند که در ارزیابی خطر هیدرولوژیکی پس از آتش سوزی در حوضه آبخیز استرالیای شرقی در نظر گرفته می شود (نیمن<sup>۷</sup> و همکاران، ۲۰۱۱: ۳۸۳).

آتش سوزی شدید جنگلی، در آگوست ۲۰۰۳، ۶۲ درصد از نهر فیشرپ<sup>۸</sup>، حوضه آبخیز ۱۵۸ کیلومتر مربعی در مرکز بریتیش کلمبیا<sup>۹</sup> و کانادا را سوزاند. اوونسو همکارانش، جریان رسوب های معلق نهر فیشرپ در دوره زمانی ۲۰۰۴-۲۰۱۰ را تعیین کردند و مقایسه این اطلاعات با داده های نهر جیمیسون<sup>۱۰</sup> انجام شد که در همان حوضه آبخیز قرار داشت اما تحت تأثیر آتش سوزی قرار نگرفته بود. بررسی ها نشان داد که اگرچه کل رواناب سالانه افزایش یافته بود اما اوج جریان در نهر فیشرپ پس از آتش سوزی به طور قابل توجهی بیشتر از قبل از آن نبود (اوونس<sup>۱۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۳: ۱۲۸).

آتش سوزی هیمن<sup>۱۲</sup> که در سال ۲۰۰۲ رخ داد، بزرگترین آتش سوزی در تاریخ کلرادو<sup>۱۳</sup> گزارش شده است. بنابراین میزان احتراق با شدت بالا بر تامین آب دنور<sup>۱۴</sup> تأثیر شدید داشت که باعث شد توجه عمومی بر اثرات ناشی از آتش سوزی بر کیفیت آب متمرکز شود. محققینی چون رهادس و همکارانش شیمی رودخانه، دما و رسوب را قبل از

1. Neris
2. Nunes
3. Flash floods
4. Mud's Flood
5. Landslides
6. Nyman
7. Nyman
8. Fishtrap Creek
9. British Columbia
10. Jamieson
11. Owens
12. Hayman
13. Colorado
14. Denver

آتش‌سوزی و در فواصل ماهانه به مدت ۵ سال پس از آتش‌سوزی کنترل کردند. نتایج حاصل از تحقیقات آن‌ها حاکی از این واقعیت بود که وسعت حوضه سوخته، ارتباط نزدیکی با شدت انتشار نیترات در ذخایر آبی و کدورت جریان آب پس از آتش‌سوزی دارد. به گونه‌ای که مناطق سوخته شده با شدت بالا (منظور شدت سوختگی بیش از ۴۵ درصد مساحت خود)، دو برابر سایر مناطق نیترات و چهار برابر کدورت داشتند (رهادس<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۱: ۴۰۳).

اسمیت و همکارانش (۲۰۱۱) در مقاله‌ی "اثرات آتش‌سوزی بر کیفیت آب در حوضه‌های جنگلی: مروری با پیامدهای تأمین آب" نشان دادند که اثر آتش‌سوزی بر کیفیت آب به میزان قابل توجهی متفاوت است. اغلب افزایش مقدار رسوب، مواد مغذی و شار عناصر کمیاب پس از آتش‌سوزی در حوضه‌های آبخیز گزارش شده‌است و آتش‌سوزی‌های جنگلی معمولاً تأمین آب آشامیدنی حوضه‌های جنگلی را مختل می‌کنند (اسمیت<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۱۱: ۱۷۰).

آتش‌سوزی‌ها به‌طور فزاینده‌ای، منبع انتشار آلودگی اکوسیستم‌های آبی، از طریق تولید مواد پیرولیتیک<sup>۳</sup> مضر و حمل و نقل بعدی آن‌ها (عمدتاً به کمک خاکستر)، شناخته می‌شوند. برای بررسی اثرات مخرب رواناب پر از خاکستر از مناطق سوخته بر کیفیت آب، سیلوا و همکارانش نمونه‌های خاکستر را بلافاصله پس از آتش‌سوزی جنگل جمع‌آوری کردند و سپس برای تهیه نمونه‌های آب خاکستری (AEA)<sup>۴</sup> هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای<sup>۵</sup> (PAHs) را تجزیه و تحلیل و عناصر شیمیایی چون کلسیم، گوگرد، منیزیم، پتاسیم و سدیم را تحلیل و بررسی کردند. نتایج مطالعات آن‌ها در تحقیقی در سال ۲۰۱۵ با عنوان "ارزیابی سمیت عصاره‌های آبی خاکستر ناشی از آتش‌سوزی جنگل" منتشر شد و گواه این مهم بود که در نمونه‌های برداشت شده تنها دو نوع آروماتیک چند حلقه‌ای (یعنی فناترن و نفتالین) با وزن مولکولی کم قابلیت اندازه‌گیری داشتند. به این موازات، در نمونه آب خاکستری بعنوان نمونه جمع‌آوری شده، بررسی‌های غربالگری اکوتوکسیکولوژیک<sup>۶</sup> با چهار گونه آبی استاندارد از گروه‌های عملکردی مختلف و سطوح تغذیه‌ای انجام شد. آنالیز نتایج حاصل از این غربال‌گری مشخص کرد که آلاینده‌ها در کاهش رشد دو گروه جلبک اصلی یعنی "ریز جلبک آب‌های شیرین"<sup>۷</sup> و "عدسک آبی"<sup>۸</sup> در اکوسیستم تأثیرگذار بوده و از شب‌تابی<sup>۹</sup> باکتری و بی‌ریوناسه<sup>۱۰</sup> جلوگیری کرده است. به‌طور کلی، نتایج حاضر بر نقش آتش‌سوزی‌های جنگلی به عنوان منبع بالقوه انتشار آلودگی به بدنه‌های آبی پایین دست تأکید می‌کند و معتقد است این روند، شرایط شیمیایی و اکولوژیکی را به خطر می‌اندازد (سیلوا<sup>۱۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۵: ۴۰۱).

سیلینس و همکارانش (۲۰۱۴) پیوندهای اکوهیدرولوژیکی بین تولید فسفر، جلبک‌ها، بی‌مهرگان کفزی و ماهی‌ها به مدت ۴ سال پس از آتش‌سوزی شدید جنگلی در کوه‌های راکی (آلبرتا، کانادا) را مطالعه کردند. بررسی‌های این گروه از محققین مشخص ساخت که میانگین غلظت تمام اشکال فسفر ۲ تا ۱۳ برابر در رواناب‌های ناشی از منطقه سوخته، بیشتر از جریان‌های نسوخته بوده و با بازیابی کند آشفستگی همراه بود. ورود این حجم فسفر با پاسخ‌های اکولوژیکی شدید در موجودات زنده رودخانه توأم شد و بهره‌وری سالانه جلبک‌ها در نهرهای درون حوضه آبخیز سوخته‌شده ۵ تا ۷۱ برابر بیشتر از حوضه‌های مرجع تا ۵ سال پس از آتش‌سوزی ادامه داشت. تولید جلبک در این حجم

1. Rhoades
2. Smith
3. pyrolytic
4. Aqueous Extracts of Ash (AEA)
5. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs)
6. ecotoxicological
7. Pseudokirchneriella subcapitata
8. Lemna minor
9. luminescence
10. Vibrio fischeri
11. Silva

زیاد، تغییرات بزرگی در ساختار جامعه بی مهرگان کفزی ایجاد کرد، زیست توده تغییر کرد، تنوع گونه‌ها تحت تاثیر قرار گرفت و حتی در ترکیب گونه‌های محلی تغییراتی مشاهده شد (سیلینس<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۴: ۱۵۰۸).

بنابراین آتش‌سوزی‌های جنگلی، اغلب کیفیت آب را با انتقال خاکستر و خاک فرسوده به رودخانه‌ها و مخازن، تهدید می‌کند. توانایی پیش‌بینی خطرات منابع آب ناشی از آتش‌سوزی‌های جنگلی برای اجرای طرح‌های آمادگی آتش‌سوزی مؤثر بوده و نقش اساسی برای اقدامات کاهش پس از آتش‌سوزی دارد.

سانتین و همکارانش در مقاله‌ای که در سال ۲۰۱۵ منتشر کردند. برای تعیین کمیت و ویژگی‌های خاکستر تولید شده تحت شدت‌های مختلف آتش‌سوزی و پتانسیل آلودگی آب مربوطه، این رویکرد را برای آتش‌سوزی جنگلی اکالیپتوس خشک استرالیا اعمال کردند. آتش‌سوزی بالمورال<sup>۲</sup> در اکتبر ۲۰۱۳، ۱۲۶۹۴ هکتار از حوضه آبخیز جنگلی سیدنی را تحت تاثیر قرار داد. بارهای خاکستر قابل توجهی تولید کرد که با شدت آتش افزایش یافت. بررسی‌های آن‌ها نشان داد که با وجود غلظت نسبتاً پایین آلاینده‌های بالقوه، بار کل خاکستر قابل توجهی بوجود آمده که اگر این حجم از آلاینده بر اثر فرسایش روانابی به شبکه هیدرولوژیکی منتقل شوند، خطر آلودگی آب حتمی خواهد بود (سانتین<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۱۵: ۱).

تأثیر آتش‌سوزی‌ها بر منابع آبی تاکنون در مقیاس محلی مطالعه شده‌است، اما ربین و همکارانش، میزان بالقوه این اثرات در مقیاس جهانی را بررسی کردند. آن‌ها با ارائه یک شاخص فضایی صریح از در معرض قرار گرفتن، اولین گام را به سمت ارزیابی جهانی خطرات بالقوه آتش‌سوزی بر آب‌ها (WWR<sup>۴</sup>) برداشته‌اند. در مطالعات آن‌ها چندین متغیر مربوط به آتش‌سوزی و در دسترس بودن آب به عنوان شاخص‌های مواجهه، معرفی و نرمال شده‌اند. سپس تجمیع آن شاخص‌ها بر اساس وزن فردی بدست آمدند. شاخص نهایی، بیشترین حد در معرض خطر قرار گرفتن را در جنگل‌های مرطوب و خشک استوایی و حد متوسط را برای رشته کوه‌ها و بوته‌زارهای خشک، نشان داده و کمترین مقدار را در عرض‌های جغرافیایی بالایی نشان می‌دهد. این محققین معتقداند که چنین رویکردی می‌تواند بینش‌های مهمی را برای امنیت آب با هدایت حفظ منابع آب شیرین جهانی ارائه دهد (ربین<sup>۵</sup> و همکاران، ۲۰۱۶: ۲۲).

تحقیقات تورتون در ۲۰۱۷ مشخص می‌کند که کیفیت آب به سبب ورود آلاینده‌ها به پیکره آبی و تغییرات شدید DOC<sup>۶</sup> ناشی از آتش‌سوزی شدید سال ۲۰۱۶ در اطراف فورت مک‌موری<sup>۷</sup>، آلبرتا، کانادا، را بشدت تحت تأثیر قرار داده تا آنجایی که دفتر بیمه کانادا، آن را گران‌ترین فاجعه در تاریخ کانادا معرفی کرده‌است. در پی این آتش‌سوزی مناطق وسیعی از جنگل‌های شمالی بالادست سوخته و نگرانی‌های زیادی از جمله تهدید تأمین آب آشامیدنی را برانگیخت و منجر به افزایش بیش از ۱ میلیون دلاری هزینه‌های مرتبط در سال اول پس از آتش‌سوزی شد (تورتون<sup>۸</sup>، ۲۰۱۷).

پژوهش دیگر آبراهام (۲۰۱۸) آشکار کرد که سایت‌های معدنی رها شده و قدیمی که معمولاً منبع جیوه در خود جای داده‌اند، یک خطر بالقوه در بلندمدت برای منطقه هستند. مشاهدات ابراهام مشخص کرد که پس از آتش‌سوزی تجویز شده در منطقه، غلظت جیوه در خاک سطحی ۹۷٪ کاهش یافت که نشان دهنده سطح تبخیر جیوه در هنگام آتش‌سوزی است. پس از اولین بارندگی شدید فصلی، در منابع آبی منطقه غلظت جیوه ۳۵٪ افزایش یافت، که نشان می‌دهد خاکستر و ضایعات معدن حاصل از آتش‌سوزی، به کمک رواناب ناشی از ریزش جوی در سطح زمین جاری شده و به بدنه آبی در

1. Silins
2. Balmoral
3. Santin
4. Wildfire Water Risk (WWR)
5. Robinne
6. Dissolved Organic Carbon
7. Fort McMurray
8. Thurton

پایین دست وارد شده‌اند. بنابراین قبل از انجام اقدامات مدیریتی چون اعمال تغییرات در کاربری زمین، کنترل علف‌های هرز با آتش‌سوزی‌های تجویزی به بررسی دقیق محلی نیاز است (آبراهام و همکاران، ۲۰۱۸: ۱۴۴).

شهر لس‌آنجلس در حوضه آبخیز رودخانه لس‌آنجلس به مقدار ۸۳۴ مایل مربع قرارداد. از ۸ ژانویه ۲۰۲۵ حداقل سه آتش‌سوزی در سراسر این شهر رخ داد. دود و سوختگی شدید شهر، نشانی از انواع آلودگی‌های ایجاد شده‌است. نیاز آبی برای اطفای حریق باعث شد که سه مخزن آب موجود در منطقه که هر کدام یک میلیون گالن گنجایش داشتند در کمتر از بیست و چهار ساعت به پایان برسد (وبستر<sup>۱</sup>، ۲۰۲۵، IF12871). بنابراین تانکرهای هوایی در حال تخلیه هزاران گالن بازدارنده شعله قرمز به نام (Phos-Chek)<sup>۲</sup> در تپه‌های اطراف لس‌آنجلس هستند تا ویرانی ناشی از آتش‌سوزی‌های متعدد جنگلی را محدود کنند. در حالی که سازندگان این بازدارنده ادعا دارند که مواد سرطانزا در آن وجود ندارد اما در لیست مواد غیرقابل قبول سازمان جنگل‌های آمریکا، قرار داشته و می‌توانند حاوی فلزات سنگین سمی مانند کادمیوم و کروم باشند، که وارد آب‌های سطحی یا زیرزمینی خواهد شد (چپل<sup>۳</sup>، ۲۰۲۵).

نتایج تحلیل تحقیقات بررسی شده در این پژوهش به طور خلاصه در جدول (۱) آمده‌است.

جدول ۱. مروری بر تحقیقات انجام شده در زمینه آتش‌سوزی و آلودگی منابع

محقق مسئول	سال	خلاصه نتایج
بلادن	۲۰۰۳	اشکال مختلف نیتروژن وارد شده به آبراه‌های حوضه آبخیز پس از آتش‌سوزی سال ۲۰۰۳ در کوه‌های راکی جنوب غربی آلبرتا را به مدت سه سال مطالعه کرده‌اند.
فریرا	۲۰۰۸	در خصوص ارزیابی فرسایش و پاسخ‌های هیدرولوژیکی پس از آتش‌سوزی تحقیق کرده‌است.
استین	۲۰۰۹	پتانسیل خطر بالقوه در نقاط پایانی را تحلیل کرده‌است.
کیان	۲۰۱۱	به بررسی جریان زباله‌ای در مناطق سوخته شیب‌دار در جنوب کالیفرنیا در سال ۲۰۱۱ می‌پردازند.
نیمن	۲۰۱۱	مستندی سیستماتیک از رویدادهای فرسایشی بزرگ پس از آتش‌سوزی جنگلی در جنوب شرقی استرالیا بین سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۹ را تهیه کردند.
رهادس	۲۰۱۱	نتایج حاصل از تحقیقات آن‌ها نشان داد که وسعت حوضه سوخته ارتباط نزدیکی با شدت انتشار نیترات در ذخایر آبی و کدورت جریان آب پس از آتش‌سوزی دارد.
اسمیت	۲۰۱۱	تحقیقات آنها نشان داد که اثر آتش‌سوزی بر کیفیت آب متفاوت است. اغلب افزایش مقدار رسوب، مواد مغذی و شار عناصر کمیاب پس از آتش‌سوزی در حوضه‌های آبخیز گزارش شده‌است و آتش‌سوزی‌های جنگلی معمولاً تأمین آب آشامیدنی حوضه‌های جنگلی را مختل می‌کنند.
اوونس	۲۰۱۳	یافته‌های این محققین حاکی از افزایش رواناب در کل حوضه مورد مطالعه است.
مودی	۲۰۱۳	بانک اطلاعات در خصوص اثرات ناشی از آتش‌سوزی‌ها با سابقه تاریخی ۷۰ ساله در مناطق طبیعی در آمریکا را تهیه کردند.
سیلینس	۲۰۱۴	پیوندهای اکوهیدرولوژیکی بین تولید فسفر، جلبک‌ها، بی‌مهرگان کفزی و ماهی‌ها به مدت ۴ سال پس از آتش‌سوزی شدید جنگلی در کوه‌های راکی (آلبرتا، کانادا) مورد مطالعه قرار داده‌اند.
منسیل‌ها	۲۰۱۴	آلودگی از نوع هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای (PAHs) در آب‌های زیرزمینی را پس از آتش‌سوزی بررسی کردند.
بلادن	۲۰۱۴	پیامدهای آتش‌سوزی جنگلی بر بسیاری از مصارف آب پایین دست به ویژه تأمین آب آشامیدنی سالم را بیان کردند که ممکن است به زیرساخت‌های اضافی برای تصفیه و افزایش عملیات و هزینه‌های نگهداری نیاز داشته باشد.
سیلوا	۲۰۱۵	به بررسی اثرات مخرب رواناب پر از خاکستر از مناطق سوخته بر کیفیت آب پرداخته‌اند.
ساتینو	۲۰۱۵	کمیت و ویژگی‌های خاکستر تولید شده تحت تاثیر میزان مختلف آتش‌سوزی و پتانسیل آلودگی آب را تعیین کردند.

1. Webster

۲. PHOS-CHEK یک بازدارنده آتش پایدار و مستقر بر سطح زمین است که قبل از نزدیک شدن آتش بر روی پوشش گیاهی قابل اشتعال و مواد سلولزی پاشیده می‌شود و تا زمانی باراندگی در منطقه باقی می‌ماند.

3. Chappell

## ادامه جدول ۱ مروری بر تحقیقات انجام شده در زمینه آتش‌سوزی و آلودگی منابع

محقق مسئول	سال	خلاصه نتایج
لانگنز	۲۰۱۶	حجم جریان زباله ناشی از یک آتش‌سوزی جنگلی در مرکز ویکتوریا در استرالیا را در سال ۲۰۱۶ مدل کردند.
کمپس	۲۰۱۶	نقش آتش‌سوزی در انتشار عناصر کمیاب و بررسی توزیع مجدد آنها با گذشت زمان از آتش‌سوزی را ارزیابی کرد
ربین	۲۰۱۶	تأثیر آتش‌سوزی‌ها بر منابع آبی در مقیاس جهانی بررسی کردند
نونس	۲۰۱۶	یک مدل ساده هیدرولوژیکی که دفع آب خاک را توصیف می‌کرد و از مقایسه داده‌های استخراج شده از یک مزرعه اکالیپتوس نسوخته با دو مزرعه اکالیپتوس سوزانده شده در شمال پرتغال بدست آمد، توانستند چرخه‌های فصلی آب‌گیری خاک را نشان دادند.
تورتون	۲۰۱۷	پژوهش آنها بیان می‌دارد که کیفیت آب به سبب ورود آلاینده‌ها به پیکره آبی و تغییرات شدید DOC ناشی از آتش‌سوزی شدید سال ۲۰۱۶ در اطراف فورتمک‌موری، آلبرتا، کانادا، بشدت تحت تأثیر قرار گرفته‌است.
نریس	۲۰۱۷	برای اولین بار از مدل پروژه پیش‌بینی فرسایش آب برای پیش‌بینی رویدادهای فرسایش و رواناب در خاک‌های آتشفشانی متأثر از آتش در اروپا استفاده کرد.
آبراهام	۲۰۱۸	به بررسی خطر تجمع فلزات پس از آتش‌سوزی در منابع آب سطحی پرداخته‌اند تا درباره تهیه برنامه‌ها و سیاست‌های مدیریتی مناسب در حین و پس از حوادث آتش‌سوزی به منظور حفظ کیفیت آب آشامیدنی شیوه‌ای کم هزینه فراهم شود.
آبراهام	۲۰۱۸	تحقیقات او مشخص کرد که سایت‌های معدنی رها شده و قدیمی که معمولاً منبع جیوه در خود جای داده‌اند، یک خطر بالقوه در بلندمدت برای منطقه بشمار می‌آیند.
بری	۲۰۲۱	بلاای آبشاری ناشی از آتش‌سوزی و تأثیر آنها بر منابع آبی را بررسی کردند که به دلیل تخریب خانه‌ها و زیرساخت‌ها و از بین رفتن جاده‌ها ایجاد شده‌است.
پیری‌کارد	۲۰۲۱	در باره هزینه های تصفیه آلودگی آب ناشی از آتش‌سوزی تحقیق کرده است.
پنینو	۲۰۲۲	آنها دریافتند که سیستم‌های آب آشامیدنی عمومی در پایین دست آتش‌سوزی‌های بزرگ، غلظت بالای از ترکیباتی مانند نیترات و آرسنیک را تجربه کرده‌اند.
پائول	۲۰۲۲	تأثیر آتش‌سوزی مناطق شهری بر روان‌آب‌ها را تعیین کردند.
ربین	۲۰۲۴	مدل کاهش خطر ورود آلاینده‌ها به حوضه آبخیز را قبل از وقوع آتش‌سوزی تبیین کرده است.
ویستر	۲۰۲۵	اطلاعات آتش‌سوزی لس‌آنجلس تا ۱۱ ژانویه ۲۰۲۵ را برای سرویس تحقیقات کنگره آمریکا تنظیم کرده است.

## روش تحقیق

پژوهش کاربردی حاضر، از نوع کیفی مبتنی بر شیوه فراتحلیل<sup>۱</sup> برای ترکیب نتایج مطالعات پیشین است، از این‌رو برای جمع‌آوری داده‌ها از روش اسناد کاوی استفاده شده‌است. جمع‌آوری اطلاعات و بررسی داده‌ها با شیوه کتابخانه‌ای صورت پذیرفت و برای تجزیه و تحلیل داده‌های گردآوری شده از کتاب، پایان‌نامه، مقالات علمی معتبر و اسناد علمی مرتبط با آلودگی منابع آب ناشی از آتش‌سوزی در یک حوضه آبخیز استفاده شده‌است. بدین ترتیب داده‌های جمع‌آوری شده برای این پژوهش در یک فرآیند مبتنی بر توصیف، تحلیل، استنتاج و ترکیب داده‌ها، تبیین و تجزیه و تحلیل شده‌است.

هدف اصلی این مطالعه بررسی نحوه ورود و تأثیر آلاینده‌های آتش‌سوزی به منابع آبی است. همچنین در پی آن است که چارچوب شیوه ردیابی آلاینده‌ها پس از آتش‌سوزی در حوضه‌های آبخیز را شناسایی کند. این پژوهش با مرور و تحلیل یافته‌های مطالعات متعدد یک مدل مفهومی، برای ارزیابی تأثیر آلاینده‌های ناشی از آتش‌سوزی در حوضه آبخیز معرفی می‌کند، سپس چارچوبی برای پیش‌بینی خطرات آلودگی آب پس از آتش‌سوزی را ارائه می‌دهد و در نهایت تأثیر کلی آتش در حوضه آبخیز و روند ورود آلاینده‌ها به آن را تبیین می‌نماید.

تحقیق حاضر در راستای دست‌یابی به اهداف مذکور، بدنبال یافتن پاسخ پرسش‌های زیر است:

۱. روش فراتحلیل یا متا آنالیز (Meta-Analysis)، یک روش کمی و عینی برای ترکیب نتایج مطالعات پیشین در یک موضوع خاص است.

۱. آتش سوزی چه تأثیری بر حوضه آبخیز دارد؟
۲. آتش سوزی چگونه منابع آبی یک حوضه آبخیز را آلوده می‌کند؟
۳. آتش سوزی چه نوع آلاینده‌هایی را به پیکره آبی یک حوضه وارد می‌کند؟

### بحث و یافته‌های تحقیق

#### تأثیر آتش سوزی طبیعی بر حوضه آبخیز

بررسی مطالعات متعدد درباره پاسخ به این پرسش که «آتش سوزی چه تأثیری بر حوضه آبخیز دارد؟» نشان می‌دهد که میزان تأثیرات آتش سوزی بر اکوسیستم‌های آبی به شدت سوختگی، رژیم بارندگی پس از آتش سوزی، پوشش زمین قبل از آتش سوزی و تاریخچه اختلالات منطقه آسیب دیده، بستگی دارد، زیرا این امر بر بهبود پس از آتش سوزی تأثیر می‌گذارد. به همین سبب شدت سوختگی، عامل پیش‌بینی‌کننده اثرات آتش سوزی شناخته شده و در مدل‌سازی هیدرولوژیکی و فرسایش خاک پس از آتش سوزی مورد توجه قرار می‌گیرد. همچنین بازیابی پوشش گیاهی و خواص متفاوت خاک شرایط متفاوتی را به هنگام شبیه‌سازی آتش سوزی ایجاد می‌کند (باسو و همکاران، ۲۰۲۲: ۲۵).

همچنین بر اساس یافته‌های ناشی از تحلیل پژوهش‌های مختلف، در حالت کلی، کاهش نفوذپذیری خاک و از بین رفتن پوشش گیاهی پس از آتش سوزی، از مهم‌ترین عوامل افزایش مقدار رواناب در حوضه است. بدین ترتیب بارندگی‌های پس از آتش سوزی سبب ورود حجم عظیمی از خاکستر و آلاینده‌های بیوفیزیکی و بیوشیمیایی به منابع آبی در سطح و پایین دست حوضه آبخیز می‌شوند.

#### تأثیر آتش سوزی شهری - طبیعی بر منابع آب

شهرهایی که در مناطق طبیعی گسترش و رشد کرده‌اند به (WUI<sup>۱</sup>) معروف هستند. آتش سوزی در این مناطق خسارات گسترده‌تری دارد مانند لس‌آنجلس (لی<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۲۳: ۵۷۸۹). آتشی که ۱۵۰ کیلومتر مربع از مناطق طبیعی در لس‌آنجلس را در بر گرفته، بیش از ۱۵۰ میلیارد دلار خسارت وارد کرده است.

بر اساس یافته‌های این تحقیق می‌توان انتظار داشت، آلاینده‌های متنوعی که از سوختن شهری نظیر لس‌آنجلس در هوا و سطح زمین ایجاد شده (چگنت<sup>۳</sup>، ۲۰۲۵). علاوه بر انتشار ماده Phos-Chek که برای اطفای حریق استفاده می‌شود، احتمالاً شرایط خطرناکی را در حوضه آبخیز لس‌آنجلس ایجاد کند (شکل ۱۰).



ج) دود و آلودگی هوا ناشی از آتش در لس‌آنجلس



ب) تانکر هوایی در حال تخلیه Phos-Chek در سطح حوضه



الف) رواناب ناشی از اطفای حریق

#### شکل ۱۰ آتش سوزی لس‌آنجلس در ژانویه ۲۰۲۵

الف) نمایی از رواناب ناشی از اطفای حریق را در مناطق سوخته شده شهر، نشان می‌دهد.

ب) یک تانکر هوایی را در حال تخلیه مواد بازدارنده آتش در سطح حوضه آبخیز لس‌آنجلس نشان می‌دهد.

ج) آلودگی هوا ناشی از سوختن شهر لس‌آنجلس را نشان می‌دهد (منبع: [www.npr.org](http://www.npr.org), [www.latimes.com](http://www.latimes.com), [www.nbcnews.com](http://www.nbcnews.com))

1. Wildland/Urban Interface
2. Li
3. Chognot

در ادامه به مهمترین اثرات ناشی از آتش سوزی لس آنجلس بر حوضه آن اشاره شده است:

#### ۱. اثرات فوری کیفیت آب

آلودگی رواناب: این آتش سوزی می تواند منجر به انتشار آلاینده های مختلف از جمله فلزات سنگین، هیدروکربن ها و ذرات معلق از ساختارهای سوخته و پوشش گیاهی شود. هنگام بارش باران، این آلاینده ها به سیستم های زهکشی و آب های مجاور نفوذ می کنند.

افزایش بارگیری مواد مغذی: سوزاندن پوشش گیاهی سبب شستشوی مواد مغذی، به ویژه نیتروژن و فسفر خواهد شد همچنین منجر به شکوفایی جلبک ها در آب، کاهش سطح اکسیژن و آسیب رساندن به آبزیان می شود.

#### ۲. تغییر در زیرساخت تامین آب

آسیب به سیستم های آب: آتش سوزی مذکور می تواند به زیرساخت های تامین آب: لوله ها، تصفیه خانه ها و مخازن آسیب رسانده و منجر به اختلال در تامین آب شود.

آلودگی منبع آب: اگر آتش سوزی در نزدیکی منابع آب (مانند رودخانه ها، دریاچه ها) رخ دهد، رواناب، خاکستر و جریان زباله های ناشی از این آتش رودخانه لس آنجلس را آلوده خواهد کرد و فرآیندهای تصفیه آب آشامیدنی را پیچیده می کند.

#### ۳. تغییرات هیدرولوژیکی

تغییر الگوهای رواناب: این آتش سوزی گسترده پوشش زمین را تغییر داده است و احتمالاً بر نحوه جذب آب در زمین و میزان سرازیر شدن آن به نهرها و رودخانه ها تأثیر خواهد گذاشت.

فرسایش خاک: از بین رفتن پوشش گیاهی منجر به افزایش فرسایش خاک، کاهش توانایی زمین برای حفظ آب و تأثیر بر سفره های آب محلی و تغذیه آب زیرزمینی می شود.

#### ۴. اثرات بلند مدت اکوسیستم

بازیابی پوشش گیاهی: روشی که پوشش گیاهی پس از آتش سوزی، بهبود می یابد و بر کیفیت و کمیت آب تأثیر می گذارد. ممکن است برخی از مناظر به سرعت بهبود یافته و برخی دیگر سال ها طول بکشد و بر چرخه آب محلی تأثیر بگذارد.

تغییر زیستگاه: تنوع زیستی نقش اساسی در حفظ سیستم های آب سالم دارد. تغییر در اکوسیستم های محلی می تواند بر تنوع زیستی تأثیر بگذارد.

#### ۵. بهداشت عمومی و نگرانی های ایمنی

کیفیت آب آشامیدنی: آلاینده ها اگر وارد منابع آب آشامیدنی شوند، برای سلامتی انسان خطراتی را ایجاد می کنند از این رو نیاز به اجرای اقدامات اضطراری است تا از سلامت آب اطمینان حاصل شود.

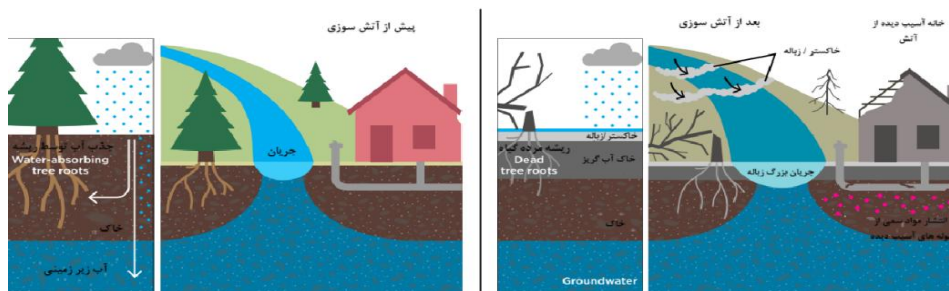
ایمنی آب های تفریحی: آب های آلوده شده، ممکن است برای استفاده تفریحی ناامن شوند و بر رفاه جامعه و اقتصاد محلی تأثیر بگذارند.

#### ردپای آلودگی آب پس از آتش سوزی

برای پاسخ دادن به پرسش دوم تحقیق «آتش سوزی به چه نحوی منابع آبی یک حوضه آبخیز را آلوده می کند؟» ابتدا باید ردپای آب در حوضه را بررسی کنیم. آب در یک حوضه آبخیز در سیستم های سطحی مانند رودخانه ها و نهرها،

درختان و در خاک‌ها یا در زیرزمین در سفره‌های آب زیرزمینی ذخیره می‌شود. این ذخایر مختلف آب به هم متصل بوده و آب از طریق فرآیندهای مختلف به حوضه آبخیز وارد و یا از آن خارج می‌شود. در نتیجه آتش سوزی‌ها بر هر بخش از سیستم آب تأثیر متفاوتی می‌گذارند.

حوضه‌های آبخیز شامل طیف وسیعی از انواع اکوسیستم‌ها از جمله ارگانسیم‌هایی هستند که اقدامات حیاتی را برای حفظ آب آشامیدنی سالم انجام می‌دهند. درختان و سایر گیاهان از طریق سیستم ریشه خود، خاک را تثبیت کرده و مقدار آب و مواد مغذی موجود در اکوسیستم را با استفاده از آب تنظیم می‌کنند. خاک‌ها با جذب نزولات جوی و حذف آلاینده‌ها به مثابه سیستم‌های تصفیه عمل کرده و در نهرها، حشرات، حیوانات کوچک و میکروارگانسیم‌ها مانند باکتری‌ها و قارچ‌ها، مواد آلی و ترکیبات محلول را تجزیه می‌کنند و بیشتر موادی را که آب آشامیدنی را آلوده می‌کنند، از بین می‌برند. آتش سوزی‌های جنگلی این فرآیندها را مختل کرده و در نتیجه دسترسی به منابع آبی و کیفیت آن‌ها را برای یک دوره چند ساله یا حتی ده‌ها سال پس از خاموش شدن آتش تهدید می‌کنند. آتشی که یک حوضه آبخیز را می‌سوزاند می‌تواند بیش از ۹۰ درصد پوشش گیاهی منطقه را از بین ببرد و خاک آن حوضه را تغییر دهد بنابراین ریشه گیاهان سوخته، دیگر نمی‌تواند خاک را تثبیت کرده یا آب را جذب کند (شکل ۲). (باسو و همکاران، ۲۰۲۲: ۲۵).



شکل ۲. نمایی شماتیک از خطرات ناشی از آتش سوزی در حوضه آبخیز (منبع: باسو و همکاران: ۲۰۲۲)

بنابراین آب بیشتری می‌تواند مناطق طبیعی و جنگلی را ترک کند و به رودخانه‌ها و جویبارهای مجاور سرازیر شود بدین ترتیب شدت جریان افزایش می‌یابد. در اکوسیستم‌هایی که دچار سوختگی زیاد شده و بارندگی‌های شدید را تجربه می‌کنند، این فرآیند خطر سیل، رانش زمین و جریان زباله‌ها را افزایش می‌دهد که در آن گیاهان نابود شده، آب صخره‌ها و انواع آلاینده‌ها را به پایین دست منتقل می‌کند (شکل ۳).



شکل ۳. بسته شدن راه آبراه‌ها بر اثر جریان زباله‌ای ناشی از آتش سوزی (باسو و همکاران: ۲۰۲۲)

بدین ترتیب ردپای آلودگی آب پس از آتش سوزی در سطح یک حوضه را باید در ذخایر آب زیرزمینی، پوشش گیاهی و شرایط هیدرولوژیکی و فرسایش خاک، مناطق پایین دست و مناطق شهری - طبیعی<sup>۱</sup> دنبال کرد، برای این منظور در ادامه عوامل یاد شده، تجزیه و تحلیل می‌شوند.

### تأثیر آتش‌سوزی بر ذخایر آب زیرزمینی

آتش‌سوزی‌های مناطق طبیعی رابطه مستقیم با تغییر خالص سطح آب‌های زیرزمینی دارند به گونه‌ای که افزایش جریان آب به داخل نهرها پس از آتش‌سوزی، می‌تواند در پر کردن آب‌های زیرزمینی مفید باشد. از طرفی با کاهش توانایی خاک برای جذب مقدار آبی که به طور معمول در آب‌های زیرزمینی نفوذ کرده، می‌تواند سطح آب‌های زیرزمینی را تا دو سال کاهش دهند. در واقع در طول آتش‌سوزی‌های شدید، بسبب وجود دمای بالا، ساختار و شیمی خاک به گونه‌ای تغییر می‌کند که سطح خاک، آب‌گریزتر شده و خاک بارش کمتری را جذب خواهد کرد و آب به راحتی روی سطح خاک جریان می‌یابد و ذرات خاک، رسوبات و مواد مغذی مانند نیتروژن و فسفر را با خود می‌برد (ویلیام و همکاران، ۲۰۲۲: ۶۹۱۱۹). بنابراین آتش‌سوزی‌ها با تغییر مقدار آب در مخازن آب زیرزمینی، مانند سفره‌های زیرزمینی، شرایط زیرزمینی را نیز تغییر می‌دهد.

### تأثیر آتش‌سوزی‌ها بر پوشش گیاهی

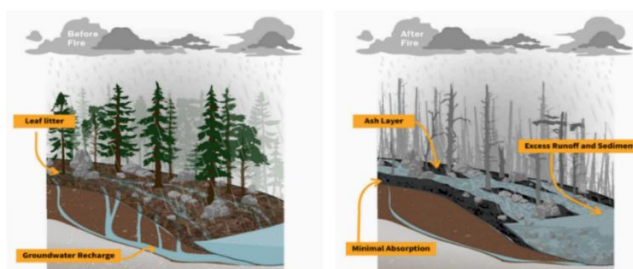
بررسی مطالعات متعدد حاکی از آن است که آتش‌سوزی‌های پوشش گیاهی یکی از مهم‌ترین اختلالات در جهت بهبود و برگشت پذیری منطقه آسیب‌دیده است. از جمله تحقیقات (نونس و همکاران، ۲۰۱۸: ۴۶۳). که بیان می‌دارد سالانه حدود ۴ درصد از سطح زمین‌های پوشش‌دار جهانی تحت تأثیر آتش‌سوزی قرار می‌گیرند. اهمیت این آمار به این دلیل است که اکوسیستم‌های مستعد آتش‌سوزی مانند جنگل‌ها، چمن‌زارها و مراتع، ۶۰ درصد از آب ۱۰۰ شهر بزرگ جهان را تأمین می‌کنند. درحالی‌که مساحت جهانی زمین‌های سوخته در دو دهه گذشته تا حدود ۲۰ درصد کاهش یافته، اما عمدتاً به دلیل گسترش کشاورزی، بسیاری از مناطق حیاتی، برای تأمین آب در معرض خطر فزاینده آتش‌سوزی قرار گرفته‌اند. علت این امر تغییرات اقلیم، طولانی‌تر شدن فصل آتش‌سوزی در بسیاری از مناطق رها شدن زمین و گرایش به آتش‌سوزی‌های تجویزی در ابعاد گسترده‌تر است.

### تأثیر آتش‌سوزی‌های تجویز شده بر یک حوضه آبخیز

آتش‌سوزی‌های تجویز شده، برخلاف آتش‌سوزی‌های جنگلی، تأثیر منفی بر منابع آبی ندارد بلکه سوختگی‌های تجویز شده با شدت کم، گرمایش خاک را محدود می‌کند و در نتیجه احتمال ایجاد خاک‌هایی که آب را دفع می‌کنند و منجر به آبشارهای فرسایشی، رواناب و جریان‌های زباله می‌شود، در آن‌ها کمتر است (استفنز و همکاران، ۲۰۲۱: ۸۱۰۰۴).

### تأثیر آتش‌سوزی بر فرآیندهای هیدرولوژیکی و فرسایشی

بررسی ربین حاکی از آن است که خاکستر و رسوبات ناشی از آتش‌سوزی اکوسیستم گیاهی، منجر به افزایش کدورت و دمای آب می‌شود. تجمع این عوامل منجر به افزایش فعالیت بیولوژیکی در اکوسیستم آبی شده و سطح اکسیژن محلول را در محیط کاهش می‌دهد، بدین ترتیب بقای حیات آبزیان را به خطر می‌اندازند (ربین، ۲۰۲۴).



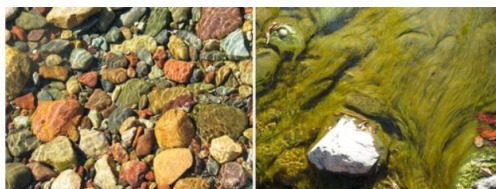
شکل ۴ نمای شماتیک از رواناب حاوی خاکستر و افزایش کدورت منابع آبی در حوضه پس از آتش‌سوزی (منبع: ربین، ۲۰۲۴)

تحقیقات (آبراهام و همکاران، ۲۰۱۸: ۱۰۲۲) نشان می‌دهد، اولین بارندگی شدید پس از آتش‌سوزی و رواناب‌های متوالی ناشی از آن، در فرسایش خاک و انتقال خاکستر و رسوبات نقش مهمی دارد و به طور طبیعی با انتقال عناصر سمی، از جمله جیوه و سایر آلاینده‌ها به اکوسیستم‌های آبی پایین دست همراه است. بنابراین فرآیندهای هیدرولوژیکی و فرسایشی در صورت وقوع طوفان پس از آتش‌سوزی تسریع شده و اغلب با هم ترکیب و موجب کاهش کیفیت آب می‌شود (شکل ۴).

### تأثیر آتش‌سوزی بر مناطق شهری - طبیعی

بررسی مطالعات متعدد مشخص کرد که در سراسر ایالات متحده، سیستم‌های آب آشامیدنی عمومی در مناطق شهری پس از آتش‌سوزی‌های بزرگ، غلظت بالایی از ترکیباتی مانند نیترات و آرسنیک دارند که در برخی موارد، از سطوح قابل قبول بر اساس قانون آب آشامیدنی ایمن بالاتر رفته است (پنینو<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۲۲: ۱۴۹۸۹۰). اگر آتش‌سوزی مناطق طبیعی با سرایت آتش به منطقه شهری همراه باشند، بطور مستقیم به زیرساخت‌های آبی در این مناطق صدمه وارد خواهند کرد و تجمع آلاینده‌ها (از جمله بنزن) افزایش یافته و بحران جدی برای حوضه آبخیز در آن منطقه بوجود خواهند آورد (پائول و همکاران، ۲۰۲۲: ۳۰۶۹۹).

چنین بلايای آبشاری به دلیل تخریب خانه‌ها و زیرساخت‌ها و از بین رفتن جاده‌ها یا اختلال در دسترسی به آن‌ها مانند آنچه در کالیفرنیا در سال ۲۰۱۸ رخ داد، مانع برگشت‌پذیری سریع جامعه می‌شود. شکل ۵ رانش گل در سال ۲۰۲۱ در مناطقی که در آتش‌سوزی گریزلی کلرادو در سال ۲۰۲۰ سوخته بودند را نشان می‌دهد که ۷۰ آبراه را در حوضه آبخیز منطقه بست. بگونه‌ای که عواقب این آتش‌سوزی جنگلی بر تامین آب در مناطق مجاور تا فاصله ۱۰۰ مایلی مشاهده شده است (بری و همکاران، ۲۰۲۱: ۱۶۴۵).



شکل ۵ نمونه‌هایی از بستر جریان نسوخته (سمت چپ) و پس از آتش‌سوزی (راست) (منبع: بلادن و همکاران، ۲۰۱۴)

لوله‌های آبی که آتش‌سوزی آن‌ها را تخریب کرده، می‌تواند منبع آلودگی ذخایر آبی باشد. این لوله‌ها معمولاً برای تحمل دمای بالا ساخته نشده از این رو اغلب در طول آتش‌سوزی و پس از آن، دچار آسیب‌دیدگی گسترده می‌شوند (شکل ۲). برای مثال، آتش‌سوزی که کمپ پارادایس کالیفرنیا را در سال ۲۰۱۸ ویران کرد، زیرساخت‌های آب شهر را نیز نابود و شبکه توزیع آب محلی را برای ماه‌ها پس از وقوع آتش‌سوزی آلوده کرد. بنابراین کیفیت پایین آب برای یک دوره طولانی کارآمدی تصفیه‌خانه‌ها را در طول زمان کاهش می‌دهد هزینه‌های زیادی برای شرکت‌ها و جوامع محلی دارد. به عنوان مثال، پس از یک آتش‌سوزی بزرگ در سال ۲۰۰۳، شهر دنور کلرادو، ۲۷ میلیون دلار برای بازسازی زیرساخت‌های آبی خود، از بازسازی اکوسیستم تا حذف رسوب، هزینه کرد (پریکارد<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۲۱: ۲۴۳۳).

بنابراین یافته‌های این پژوهش تأکید دارند که در جوامع وابسته یا پایین دست مناطق سوخته، به دلیل سوختن ماشین‌ها، خانه‌ها و سایر زیرساخت‌ها در طول آتش‌سوزی، ترکیبات سمی آزاد می‌شود که منابع آب را آلوده کرده و مشکلات جدی برای کیفیت و در دسترس بودن آب ایجاد می‌کند.

## آلاینده‌ها

پاسخ به آخرین پرسش این تحقیق «آتش‌سوزی چه نوع آلاینده‌هایی را به پیکره آبی یک حوضه وارد می‌کند؟» نیازمند شناسایی انواع رسوبات حاوی آلاینده‌های ناشی از آتش‌سوزی در سطح منطقه و برآورد این آلاینده‌ها است که در ادامه به آن‌ها پرداخته می‌شود.

انواع رسوبات وارد شده به اکوسیستم‌های آبی پس از آتش‌سوزی در یک حوضه آبخیز مطالعات انجام شده در مورد نوع رسوبات ناشی از آتش در مناطق مختلف، بیانگر آن است که مقادیر زیادی خاکستر در نقاطی که پوشش گیاهی ضخیم‌تری دارند به ویژه آتش‌هایی که شاخه‌های درختان را از بین می‌برند، بوجود می‌آید (ترین<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۲۱: ۱۰). از طرفی ویژگی‌های سطح زمین از جمله شدت سوختگی، ناهمواری سطح، شیب و خصوصیات توپوگرافی، اتصال فرآیندهای انتقال جریان زمینی را کنترل می‌کنند که به نوبه خود بر تحویل آلاینده‌ها به آب‌های دریافت‌کننده تأثیر می‌گذارد. در مقابل، ویژگی‌های محیط آبی مانند حجم، رژیم جریان، دما و طبقه‌بندی بر فرآیندهایی از جمله رقیق‌سازی آلاینده، تضعیف، تبدیل و تجزیه تأثیر گذار هستند.

نونس در تحقیقات خود متوجه شد که در محیط آبی، مخلوط خاک سطحی و خاکستر رسوب شده، غلظت مواد مغذی را افزایش می‌دهند بنابراین منبع مهم آلودگی بشمار می‌آیند چرا که حامل مواد خطرناک مانند فلزات و هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای (PAHs) هستند (نونس و همکاران، ۲۰۱۸: ۴۶۳).

یکی دیگر از مهمترین آلاینده‌هایی که در مطالعات فراوانی تجزیه و تحلیل شده، عنصر جیوه است. محققان، نگرانی‌های زیادی درباره ورود جیوه به منابع آبی دارند چون تأثیرات منفی بر سلامت انسان و اکوسیستم می‌گذارد (آبراهام و همکاران، ۲۰۱۸: ۱۴۴). یافته‌های این پژوهش در مورد ارزیابی میزان جیوه وارد شده به پیکره آبی پس از آتش‌سوزی، نشان می‌دهد که اگر جیوه به محیط آبی، وارد شود به راحتی به متیل جیوه سمی تبدیل می‌شود. گیاهان و جانوران آبی مانند ماهی‌ها، جیوه را یا مستقیماً با تماس پوستی، استنشاق و بلع ذرات خاک یا از طریق مکانیسم زنجیره غذایی، جذب می‌کنند، که حاکی از خطرزایی تجمع زیستی این عنصر فلزی است.

براساس یافته‌های این تحقیق، نوع رسوبات وارد شده به اکوسیستم‌های آبی نسبتاً متنوع است و نه تنها به لایه خاکستری رسوب شده بر روی سطح خاک وابسته است، بلکه به درجه اتصال بین منطقه سوخته و بدنه آبی پایین دست نیز بستگی دارد. آلودگی‌های ناشی از آتش‌سوزی‌های تجویزی می‌توان گفت این نوع آتش‌سوزی‌ها باعث آزاد شدن جیوه به اتمسفر و خاک منطقه شده که اغلب با بارش و رواناب‌های ناشی از آن و همچنین به کمک فعالیت بادی به منابع آب می‌رسند.

## برآورد میزان آلودگی

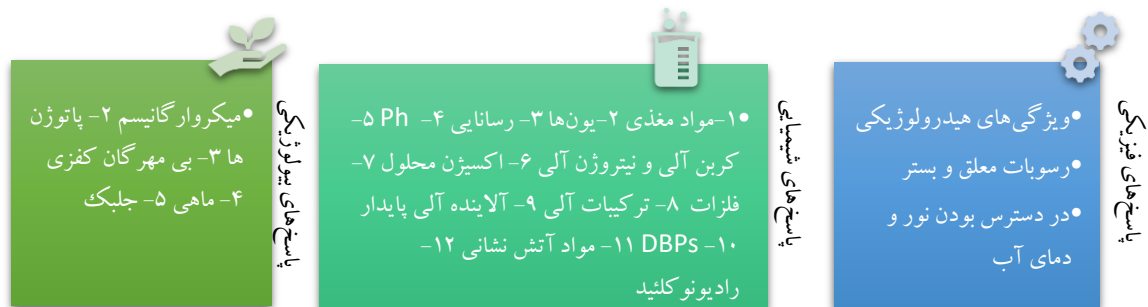
برآورد میزان آلودگی رواناب‌ها و سایر ذخایر آبی ناشی از انتقال آلاینده‌ها از مناطق سوخته به پیکره آبی در حوضه آبخیز از جمله تخمین اختلالات کیفیت آب، بررسی میزان آسیب زیستگاه گونه‌های حساس و شناسایی میزان خطرزایی رسوبات آلوده از دیدگاه مدیریتی حائز اهمیت است و تا حد زیادی به تأثیر آن بر نقاط بیولوژیکی پایانی بستگی دارد.

پائول و همکارانش (۲۰۲۲) مدل مفهومی را ارائه که متخصصین محیط‌زیست و سازمان آب در آمریکا نیز آن را تأیید کرده‌اند. در این مدل، اهداف مدیریتی براساس شاخصه‌های کاربری (زندگی مشترک آبیان، تفریح و استفاده از آب آشامیدنی) تعیین شده‌است. این کاربری‌ها بر اساس برنامه‌های مدیریتی، تعیین و کنترل کیفیت آب (شامل ارزیابی، تعیین حداکثر بار روزانه (TMDL)<sup>۱</sup> و کنترل منبع غیر نقطه‌ای) طراحی شده‌اند. همان گونه که در شکل ۹ آمده‌است در این مدل، پاسخ‌ها براساس سه گروه کلی (شکل ۶) دسته‌بندی شده‌اند:

الف) پاسخ‌های فیزیکی که ویژگی‌های هیدرولوژیکی، جریان‌های آشغال و خاکستر، نور و دمای آب را بررسی می‌کنند.

ب) پاسخ‌های شیمیایی که (۱) مواد مغذی<sup>۲</sup>، (۲) کلسیم، پتاسیم و یون‌های دیگر، (۳) رسانایی (۴) pH / قلیائیت، (۵) کربن آلی و نیتروژن آلی<sup>۶</sup>، (۶) اکسیژن محلول<sup>۵</sup>، (۷) فلزات و سایر مواد شیمیایی معدنی<sup>۸</sup>، ترکیبات آلی و آلاینده‌های آلی پایدار<sup>۷</sup> و مواد آلی محلول (DOM)<sup>۸</sup> و پلی استان (POM)<sup>۹</sup>، (۹) محصولات جانبی ضد عفونی (DBPs)<sup>۱۰</sup>، (۱۰) مواد شیمیایی آتش نشانی<sup>۱۱</sup> و در نهایت (۱۱) رادیونوکلئیدها<sup>۱۲</sup> را تجزیه و تحلیل می‌کنند.

ج) پاسخ‌های بیولوژیکی که شامل عکس‌العمل‌های زیستی در (۱) میکروارگانیسم‌ها / پاتوژن‌ها (۲) بی‌مهرگان کفزی (۳) ماهی‌ها و (۴) جلبک‌ها است (پائول و همکاران، ۲۰۲۲: ۳۰۶۹۹).



شکل ۶ دسته‌بندی نقاط پایانی برای پاسخ به آلاینده‌های ناشی از آتش سوزی در حوضه آبخیز

مدل مفهومی شکل (۹) بیان می‌دارد که آتش سوزی با از بین بردن پوشش گیاهی در منطقه سبب افزایش فرسایش خاک و افزایش رواناب در سطح حوضه آبخیز می‌شود. همچنین انواع یون‌ها و فلزات، مواد آلی پایدار، مواد آزاد شده در فرآیند اطفاء حریق و خاکستر از طریق رواناب ناشی از بارندگی و سیل به پیکره آبی رسیده و با ایجاد آلودگی، کدورت، تغییر قلیائیت، افزایش دمای آب، کاهش اکسیژن محلول، اتروفیکاسیون و تغییر در شرایط اکوسیستمی بر زندگی آبیان، تصفیه آب و مصارف تفریحی اثر نامطلوب دارد.

1. Total Maximum Daily Load
2. Nutrients
3. Conductivity
4. Organic Carbon and Organic Nitrogen
5. Dissolved Oxygen
6. Metals and Other Inorganic Chemicals
7. Organic Compounds and Persistent Organic Pollutants
8. Dissolved Organic Matter (DOM)
9. Polyoxymethylene (POM)
10. Disinfection Byproducts (DBPs)
11. Fire Fighting Chemicals
12. Radionuclides

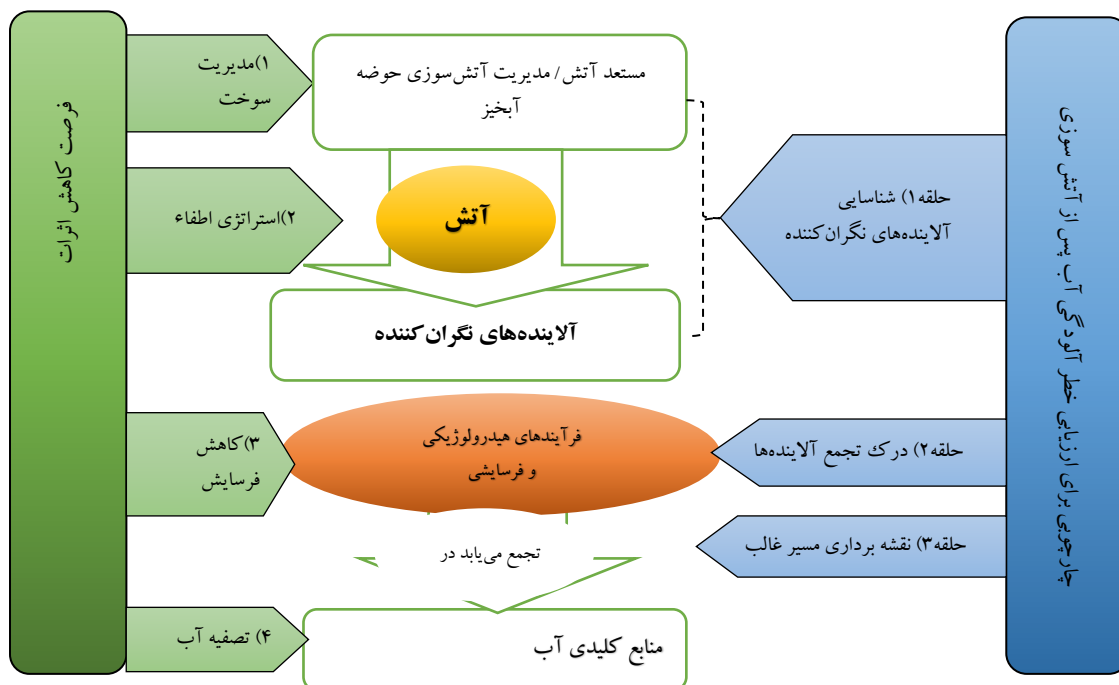
نقاط پایانی را می‌توان از نظر حجم آب یا میزان سمیت رسوب، بررسی و یا از طریق شاخص‌های بیولوژیکی ارزیابی کرد. پتانسیل خطر بالقوه را می‌توان با مقایسه غلظت آلاینده‌ها در رواناب با معیارهای کیفیت آب برای محافظت از موجودات آبی حساس ارزیابی کرد. این اثرات ممکن است مدت کوتاهی پس از ورود رواناب پس از آتش‌سوزی به پهنه دریافت‌کننده آب و یا در طول زمان آشکار شود (استین<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۰۹: ۱).

یافته‌های این پژوهش تأکید دارند که تغییر در کیفیت آب ممکن است از اثرات مستقیم رواناب و اثرات غیرمستقیم مرتبط با رسوب هوایی خاکستر ناشی شود. نتایج بررسی تحقیقات متنوع که در شکل (۷) آورده شده است، بیان می‌دارد که مناطق مستعد آتش‌سوزی نیازمند مدیریت فراکنشی هستند. بدین ترتیب می‌توان انتظار داشت که با مدیریت پیشگیرانه در فرصت مناسب و پیش از آن‌که آلاینده‌ها بتوانند در محیط‌های آبی تجمع یابند یا فرآیندهای هیدرولوژیکی را تحت تأثیر قرار دهند، بتوان از حجم تأثیرات منفی آتش در آلوده کردن منابع کلیدی در حوضه کاست (شکل ۷).

در همین خصوص ربین در رساله دکتری خود جهت کاهش شدت اثرات نامطلوب سوختگی در حوضه آبخیز به موارد زیر اشاره می‌کند (شکل ۷):

الف) مدیریت سوخت مناسب می‌تواند خطر ورود آلاینده‌ها به حوضه آبخیز را قبل از وقوع آتش‌سوزی کاهش دهد،

- ب) اطفاء حریق ممکن است گسترش آتش‌سوزی را در مناطق حساس محدود کند،
- ج) اقدامات اضطراری پس از آتش‌سوزی می‌تواند تجمع و انتقال آلاینده‌ها به ذخایر آبی را کاهش دهد،
- د) تصفیه خانه‌ها را می‌توان برای رفع نیازهای خاص ضد آلودگی اصلاح کرد (ربین<sup>۲</sup>، ۲۰۲۴).



شکل ۷ چارچوبی برای پیش‌بینی خطرات آلودگی آب پس از آتش‌سوزی (منبع: نونس و همکاران، ۲۰۱۶)





## نتیجه‌گیری

بررسی مطالعات متعدد مشخص کرد که آتش‌سوزی‌ها به طور منظم بر کیفیت آب تأثیر می‌گذارند، پیامدهای آتش‌سوزی بر اساس عواملی مانند نوع و وضعیت اکوسیستم آسیب‌دیده، فراوانی تاریخی و شدت آتش‌سوزی در منطقه، شدت بارندگی بعدی، بهبودی منظر پس از آتش‌سوزی، و ظرفیت محلی برای تصفیه آب آلوده یا به دست آوردن آب از منابع جایگزین می‌تواند بر ذخایر آب زیرزمینی، پوشش گیاهی، فرآیندهای هیدرولوژیکی و فرسایشی تأثیر بگذارد و انواع آلودگی‌ها را در مناطق پایین دست وارد کند و پاسخ رژیم جریان بارندگی را تغییر می‌دهند بدین ترتیب خطرات بالقوه‌ای برای منابع آب به همراه دارند، از جمله مواردی که برای تأمین آب آشامیدنی و زیستگاه‌های آبی وجود ایجاد می‌کنند.

آلاینده‌ها از طریق رسوب بادی یا با رواناب‌های بعدی به پیکره منابع و ذخایر آبی در منطقه وارد می‌شوند. این آلاینده‌ها شامل رسوبات، ترکیبات آلی محلول و فلزات هستند که منابع آب آشامیدنی را تهدید می‌کنند. در واقع تحقیقات متعدد بیان کرده‌اند که مقدار آلاینده‌های کیفی آب (نیترات، برخی فلزات، بنزن و محصولات جانبی ضد عفونی) از حد آن‌ها نسبت به قبل از آتش‌سوزی در محیط آبی فراتر رفته و اغلب با چندین مرتبه افزایش از سطح قابل قبول، مشاهده می‌شوند.

بر اساس نتایج فراتحلیل مشخص شد که آتش‌سوزی از طریق رسوبات هوایی، حمل خاکستر، رواناب‌ها و جریان زباله‌ای سبب آلودگی منابع آبی می‌شود. آتش‌سوزی با ایجاد آلودگی در رواناب، افزایش بار مواد معلق بر کیفیت آب، تغییر الگوی رواناب و فرسایش خاک بر سیستم هیدرولوژیکی حوضه و با از بین بردن پوشش گیاهی و خاک سطحی بر زیستگاه اثر می‌گذارد. همچنین آتش‌سوزی سبب آسیب به زیر ساخت‌ها و منابع آبی شده، کیفیت آب آشامیدنی را تغییر می‌دهد و بر مصارف تفریحی اثر مخرب دارد. آتش‌سوزی انواع آلاینده‌های فیزیکی، بیوشیمیایی و بیوزیستی را وارد پیکره آبی می‌کند.

پس از تحلیل مطالعات متعدد، یک مدل مفهومی برای پاسخ آلاینده‌ها در نقاط پایانی پس از آتش‌سوزی در حوضه آبخیز معرفی شد و در مورد انواع آلاینده‌هایی که به سبب آتش‌سوزی وارد پیکره آبی حوضه می‌شوند، این نتیجه به دست آمد که آتش‌سوزی سبب از بین رفتن خاک سطحی و پوشش گیاهی شده که خود منجر به کاهش نفوذپذیری خاک و افزایش رواناب در سطح حوضه می‌گردد، پس از آتش‌سوزی حجم جریان زباله‌ای افزایش یافته و با ورود انواع یون‌ها و فلزات، مواد آلی پایدار، مواد آزاد شده در فرآیند اطفاء حریق و یا ترکیبات متنوع موجود در خاکستر که از طریق رواناب ناشی از بارندگی و سیل به پیکره آبی رسیده و با ایجاد آلودگی، کدورت، تغییر قلیائیت، افزایش دمای آب، کاهش اکسیژن محلول، اتروفیکاسیون و تغییر در شرایط اکوسیستمی بر زندگی آبزیان، تصفیه آب و مصارف تفریحی اثر نامطلوب دارد. برای نمونه بررسی‌ها نشان داد که آتش‌سوزی توانسته غلظت جیوه در منابع آبی را تا ۳۵٪ و غلظت نیتروژن آلی محلول را تا چهار برابر حد مجاز و نیتروژن کل را تا پنج برابر، فسفر را ۲ تا ۱۳ برابر افزایش دهد.

بر اساس اطلاعاتی که از تحقیقات مختلف بدست آمد می‌توان اظهار داشت که برای ارزیابی شدت و مقدار آلودگی در منابع آبی موجود در یک حوضه آبخیز که بر اثر آتش‌سوزی تولید می‌شوند و به منابع آبی می‌رسند لازم است در ابتدا شدت سوختگی در منطقه را مشخص کنیم. سپس مولفه‌های نفوذ، زبری سطح و فرسایش که بر مقدار رواناب تأثیر گذار هستند تجزیه و تحلیل شوند. در ادامه باید رسوبات معلق و ته‌نشین شده در منابع آبی بررسی شوند. این آلاینده‌ها می‌توانند فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی باشند و پاسخ اکوسیستم آبی به آن‌ها در کاربری محیط آبی، نحوه تصفیه و برگشت‌پذیری محیط به شرایط عادی تأثیر گذار است.

## پیشنهادات

آلاینده‌های مختلفی که در اثر آتش‌سوزی، در یک منطقه بوجود می‌آید، می‌توانند سبب آلوده شدن منابع آب زیرزمینی یا آب آشامیدنی شده و بر تصفیه آب‌ها تأثیرگذار باشد همچنین موجب اختلالات اکوسیستمی در یک حوضه آبخیز شوند، از این رو پیشنهاد می‌شود بر اساس مدل‌ها و راهکار اشاره شده در تحقیق حاضر، به جمع‌آوری اطلاعات مورد نیاز در مناطق مستعد آتش‌سوزی پرداخته شود و بانک اطلاعات غنی در این خصوص تهیه گردد. همچنین در راستای دست‌یابی به اهداف مدیریت فراکنشی پیشنهاد می‌شود با ایجاد آتش‌سوزی‌های تجویزی به بررسی آلودگی‌های ناشی از آتش بر منابع آبی در مناطق مستعد آتش‌سوزی اقدام شود.

روش فراتحلیل یا متا آنالیز (Meta-Analysis)، یک روش کمی و عینی برای ترکیب نتایج مطالعات پیشین در یک موضوع خاص است. همچنین روش مناسبی برای خلاصه سازی نتایج تعداد زیادی از تحقیقات، در مقایسه با داوری ذهنی درباره تحقیقات است. فراتحلیل روشی برای ترکیب و مقایسه مطالعات انجام شده در حوزه‌های مختلف علمی از جمله علوم اجتماعی، علوم رفتاری، علوم پزشکی، علوم زیست محیطی و علوم کشاورزی است. فراتحلیل عبارت از رویکرد کمی که برای ترکیب نظام مند، تحقیقات قبلی و آن چه که توسط محققین پیشین انجام شده است برای دست‌یابی به جمع‌بندی درباره بدنه تحقیق و کشف دانش جدید انجام می‌شود. این تکنیک کمی تواننده اثربخشی یافته‌ها، کشف خلأ علمی و برنامه ریزی برای پژوهش‌های جدید در زمینه موضوع کاربردی مورد نظر منجر شود. در فراتحلیل، ادبیات موضوع از منابع مکتوب مورد بررسی نظام مند قرار می‌گیرد

## منابع

- Abraham, J., Dowling, K., & Florentine, S. (2018). Controlled burn and immediate mobilization of potentially toxic elements in soil, from a legacy mine site in Central Victoria, Australia. *Science of the Total Environment*, 616, 1022-1034.
- Abraham, J., Dowling, K., & Florentine, S. (2018). Effects of prescribed fire and post-fire rainfall on mercury mobilization and subsequent contamination assessment in a legacy mine site in Victoria, Australia. *Chemosphere*, 190, 144-153.
- Basso, M., Serpa, D., Mateus, M., Keizer, J. J., & Vieira, D. C. S. (2022). Advances on water quality modeling in burned areas: a review. *PLoS Water*, 1(7), e0000025.
- Bladon, K. D., Emelko, M. B., Silins, U., & Stone, M. (2014). *Wildfire and the future of water supply*.
- Bladon, K. D., Silins, U., Wagner, M. J., Stone, M., Emelko, M. B., Mendoza, C. A., ... & Boon, S. (2008). Wildfire impacts on nitrogen concentration and production from headwater streams in southern Alberta's Rocky Mountains. *Canadian Journal of Forest Research*, 38(9), 2359-2371.
- Brey, S. J., Barnes, E. A., Pierce, J. R., Swann, A. L., & Fischer, E. V. (2021). Past variance and future projections of the environmental conditions driving western US summertime wildfire burn area. *Earth's future*, 9(2), e2020EF001645.
- Campos, I., Abrantes, N., Keizer, J. J., Vale, C., & Pereira, P. (2016). Major and trace elements in soils and ashes of eucalypt and pine forest plantations in Portugal following a wildfire. *Science of the Total Environment*, 572, 1363-1376.
- Chappell B. (2025). What is the flame retardant that planes are dropping on the LA fires?. *NPR*
- Chognot J P. (2025). Los Angeles wildfires in figures. *PHYS*
- Li, S., Dao, V., Kumar, M., Nguyen, P., & Banerjee, T. (2022). Mapping the wildland-urban interface in California using remote sensing data. *Scientific reports*, 12(1), 5789.
- Ferreira, A. J. D., Coelho, C. D. O., Ritsema, C. J., Boulet, A. K., & Keizer, J. J. (2008). Soil and water degradation processes in burned areas: Lessons learned from a nested approach. *Catena*, 74(3), 273-285.
- Kean, J. W., Staley, D. M., & Cannon, S. H. (2011). In situ measurements of post-fire debris flows in southern California: Comparisons of the timing and magnitude of 24 debris-flow events with rainfall and soil moisture conditions. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 116(F4).
- Langhans, C., Smith, H. G., Chong, D. M., Nyman, P., Lane, P. N., & Sheridan, G. J. (2016). A model for assessing water quality risk in catchments prone to wildfire. *Journal of Hydrology*, 534, 407-426.
- Mansilha, C., Carvalho, A., Guimarães, P., & Espinha Marques, J. (2014). Water quality concerns due to

- forest fires: Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) contamination of groundwater from mountain areas. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*, 77(14-16), 806-815.
- Moody, J. A., Shakesby, R. A., Robichaud, P. R., Cannon, S. H., & Martin, D. A. (2013). Current research issues related to post-wildfire runoff and erosion processes. *Earth-science reviews*, 122, 10-37.
- Neris, J., Elliot, W. J., Doerr, S. H., & Robichaud, P. R. (2017, April). Development of a model to predict ash transport and water pollution risk in fire-affected environments. *In EGU General Assembly Conference Abstracts* (p. 18845).
- Nunes, J. P., Doerr, S. H., Sheridan, G., Neris, J., Santín, C., Emelko, M. B., ... & Keizer, J. (2018). Assessing water contamination risk from vegetation fires: Challenges, opportunities and a framework for progress. *Hydrological Processes*, 32(5), 687-694.
- Nunes, J. P., Malvar, M., Benali, A. A., Rial Rivas, M. E., & Keizer, J. J. (2016). A simple water balance model adapted for soil water repellency: application on Portuguese burned and unburned eucalypt stands. *Hydrological Processes*, 30(3), 463-478.
- Nyman, P., Sheridan, G. J., Smith, H. G., & Lane, P. N. (2011). Evidence of debris flow occurrence after wildfire in upland catchments of south-east Australia. *Geomorphology*, 125(3), 383-401.
- Owens, P. N., Giles, T. R., Petticrew, E. L., Leggat, M. S., Moore, R. D., & Eaton, B. C. (2013). Muted Responses of streamflow and suspended sediment flux in a wildfire-affected watershed. *Geomorphology*, 202, 128-139.
- Paul, M. J., LeDuc, S. D., Lassiter, M. G., Moorhead, L. C., Noyes, P. D., & Leibowitz, S. G. (2022). Wildfire induces changes in receiving waters: A review with considerations for water quality management. *Water Resources Research*, 58(9), e2021WR030699.
- Pennino, M. J., Leibowitz, S. G., Compton, J. E., Beyene, M. T., & LeDuc, S. D. (2022). Wildfires can increase regulated nitrate, arsenic, and disinfection byproduct violations and concentrations in public drinking water supplies. *Science of the Total Environment*, 804, 149890.
- Prichard, S. J., Hessburg, P. F., Haggmann, R. K., Povak, N. A., Dobrowski, S. Z., Hurteau, M. D., ... & Khatri-Chhetri, P. (2021). Adapting western North American forests to climate change and wildfires: 10 common questions. *Ecological applications*, 31(8), e02433.
- Rhoades, C. C., Entwistle, D., & Butler, D. (2011). The influence of wildfire extent and severity on streamwater chemistry, sediment and temperature following the Hayman Fire, ColoradoA. *International Journal of Wildland Fire*, 20(3), 430-442.
- Robinne, F. (2024). Effects of forest fires on watershed ecosystems. *Water Resources Division of the Government of Northwest Territories*.
- Robinne, F. N., Miller, C., Parisien, M. A., Emelko, M. B., Bladon, K. D., Silins, U., & Flannigan, M. (2016). A global index for mapping the exposure of water resources to wildfire. *Forests*, 7(1), 22.
- Santín, C., Doerr, S. H., Otero, X. L., & Chafer, C. J. (2015). Quantity, composition and water contamination potential of ash produced under different wildfire severities. *Environmental Research*, 142, 297-308.
- Silins, U., Bladon, K. D., Kelly, E. N., Esch, E., Spence, J. R., Stone, M., ... & Tichkowsky, I. (2014). Five-year legacy of wildfire and salvage logging impacts on nutrient runoff and aquatic plant, invertebrate, and fish productivity. *Ecohydrology*, 7(6), 1508-1523.
- Silva, V., Pereira, J. L., Campos, I., Keizer, J. J., Gonçalves, F., & Abrantes, N. (2015). Toxicity assessment of aqueous extracts of ash from forest fires. *Catena*, 135, 401-408.
- Smith, H. G., Sheridan, G. J., Lane, P. N., Nyman, P., & Haydon, S. (2011). Wildfire effects on water quality in forest catchments: A review with implications for water supply. *Journal of Hydrology*, 396(1-2), 170-192.
- Stein, E. D., & Brown, J. (2009). Effects of post-fire runoff on surface water quality: Development of a southern California regional monitoring program with management questions and implementation recommendations. *Southern California Coastal Water Research Project Technical Report*, 598, 1-36.
- Stephens, S. L., Thompson, S., Boisramé, G., Collins, B. M., Ponisio, L. C., Rakhmatulina, E., ... & Wilkin, K. (2021). Fire, water, and biodiversity in the Sierra Nevada: A possible triple win. *Environmental Research Communications*, 3(8), 081004.
- Thurton, D. (2017). Fort McMurray seeing big spike in water-treatment costs. *CBC News Edmonton*.
- Tran, T., Baribeau, H., & Sullivan, L. (2021). Mitigate wildfire impacts on drinking water quality and operations. *Opflow*, 47(5), 10-15.
- Webster E M. (2025). January 2025 Los Angeles County Wildfire., *congressional research service*. IN FOCUS, IF12871
- Williams, A. P., Livneh, B., McKinnon, K. A., Hansen, W. D., Mankin, J. S., Cook, B. I., ... & Lettenmaier, D. P. (2022). Growing impact of wildfire on western US water supply. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 119(10), e2114069119