



دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز  
فصلنامه آلودگی‌های محیطی و توسعه پایدار شهری

دوره اول، شماره ۱، پیاپی ۱

بهار ۱۴۰۳، صفحات ۲۰-۱

## "مقاله مروری"

# مروری بر روش‌های نوین حذف آلودگی‌های محیط زیست: فرآیندهای فوتولیز و $UV/H_2O_2$

## حذف آلودگی‌ها توسط فرآیندهای فوتولیز و $UV/H_2O_2$

حامد اسکندرلو\*

استادیار گروه شیمی، دانشگاه لاورن، لوس آنجلس، کالیفرنیا، ایالات متحده آمریکا

\*نویسنده مسئول مکاتبات: heskandarloo@laverne.edu

(دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۵/۲۲، پذیرش نهایی: ۱۴۰۲/۰۷/۱۷)

## چکیده

آلاینده‌های آلی نظیر ترکیبات رنگزا، ترکیبات دارویی، آفت‌کش‌ها و غیره به طور فزاینده‌ای در منابع آب یافت می‌شوند و بنابراین باید با فناوری‌های نوین تصفیه آب کنترل شوند. فن‌آوری‌های اکسیداسیون پیشرفته اغلب به عنوان یک روش موثر برای حذف آلاینده‌های آلی استفاده می‌شوند. فرآیند  $UV/H_2O_2$  نتایج قابل قبولی را در حذف طیف وسیعی از آلاینده‌های مذکور نشان داده است. در این مقاله، مروری بر کارایی فرآیندهای فوتولیز و  $UV/H_2O_2$  در حذف آلاینده‌های آلی صورت گرفته و نتایج مهم حاصله گزارش گردیده است.

واژه‌های کلیدی: فرآیند فوتولیز،  $UV/H_2O_2$ ، آلاینده‌های رنگزا، آلاینده‌های دارویی

## مقدمه

افزایش جمعیت جهان و کاهش منابع آب آشامیدنی، نگرانی‌هایی را درباره تامین آب آشامیدنی مورد نیاز کشورهای مختلف در سراسر جهان به وجود آورده است و کمبود آب که در نتیجه افزایش آلودگی‌های زیست محیطی شدت پیدا می‌کند، سبب شده است تامین آب بهداشتی مورد نیاز مردم به یکی از مشکلات اساسی جهان امروز تبدیل شود. امراض ناشی از آلودگی منابع آب، روزانه سبب کشته شدن هزاران و شاید ده‌ها هزار نفر از مردم جهان می‌شود، این در حالی است که امکان بازیافت آب، دسترسی به یک منبع مناسب برای مصارف گوناگون را فراهم خواهد آورد (۱). از طرف دیگر، مصرف خانگی و فعالیت صنعتی به ویژه در کشورهای توسعه یافته، مقدار قابل توجهی از پس‌مانده‌های فاضلاب، تولید می‌کنند. این فاضلاب‌ها مستقیماً به کانال‌های طبیعی وارد می‌شوند و آثار مخربی را در محیط زیست به وجود می‌آورند. در دهه اخیر، روان آب‌های شهری به دلیل پیشرفت‌های چشمگیر در روند شهرنشینی و صنعتی شدن شهرها، حاوی انواع آلاینده‌ها می‌باشند (۲). فرآیندهای شیمیایی و فیزیکی متنوعی نظیر رسوب‌دهی شیمیایی و جداسازی آلاینده‌ها، انعقاد، الکتروانعقاد، حذف با جذب سطحی بر روی کربن فعال و غیره برای از بین بردن آلاینده‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. مشکل اساسی این روش‌ها این است که قادر به تخریب آلاینده‌ها نبوده و صرفاً آن‌ها را از یک فاز به فاز دیگری منتقل می‌کنند، در نتیجه فاز جدیدی از آلاینده‌ها تولید می‌شود و مشکل اصلی حل نشده باقی می‌ماند (۳). از نقطه نظر شیمیایی و

اقتصادی یک فرآیند ایده‌آل باید قادر به تخریب انواع مختلف آلاینده‌های آلی به مواد غیرسمی و یا به عبارت دیگر اکسیداسیون کامل آن‌ها باشد (۴).

در طی سال‌های اخیر دسته‌ای از روش‌ها موسوم به فرآیندهای اکسایش پیشرفته که جزو روش‌های تصفیه شیمیایی محسوب می‌گردند مورد توجه قرار گرفته‌اند. فرآیندهای اکسایش پیشرفته به عنوان یک روش مؤثر در تخریب آلاینده‌ها هستند. اساس این فرآیندها تشکیل اجزاء فوق‌العاده فعالی نظیر رادیکال‌های هیدروکسیل است. به نحوی که قادر به اکسایش طیف وسیعی از آلاینده‌ها می‌باشند (۳). فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته به سه دسته فرآیندهای اکسیداسیونی همگن، اکسیداسیونی ناهمگن و فرآیندهای ترکیبی اکسیداسیون پیشرفته تقسیم‌بندی می‌شوند.

در فرآیندهای اکسیداسیونی همگن از ترکیب اشعه ماوراء بنفش با یک اکسیدکننده نظیر H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> و یا O<sub>3</sub> استفاده می‌شود و در فرآیندهای اکسیداسیونی ناهمگن از ترکیب اشعه ماوراء بنفش و یک فوتوکاتالیزور نیمه رسانا نظیر TiO<sub>2</sub> استفاده می‌شود. در فرآیندهای ترکیبی اکسیداسیون پیشرفته نیز از ترکیب دستجات مختلف این فرآیندها به منظور حذف مؤثرتر آلاینده‌ها بهره برده می‌شود (۵).

بطور کلی فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته بر واکنش‌های تخریبی اکسیداسیونی متکی هستند، که در طی این فرآیندها رادیکال‌های آلی در اثر فوتولیز آلاینده آلی و یا از طریق واکنش با رادیکال هیدروکسیل تولید می‌گردند. در مرحله بعد حدواسط‌های رادیکالی حاصله توسط اکسیژن محلول

UV-C و Vacuum-UV تقسیم‌بندی شود. کاربرد پرتو ماوراء بنفش نزدیک به حدود یک قرن است که مورد توجه قرار گرفته است. چرا که در طبیعت تحت تابش نور خورشید گندزدایی به طور طبیعی انجام می‌شود. پرتو ماوراء بنفش از دسته پرتوهای پرنرژی بوده و بیش‌تر خواص و کاربردهای آن به خاطر همین انرژی زیاد آن می‌باشد.

اکثر لامپ‌های UV که در تصفیه پساب مورد استفاده قرار می‌گیرند دارای طول موج ۲۵۴ نانومتر می‌باشند. پرتو ماوراء بنفش به طور طبیعی در نور خورشید نیز وجود دارد. در واقع در طبیعت انجام عمل ضد عفونی و کنترل رشد میکروارگانیسم‌ها به همین طریق انجام می‌شود. دلیل موثر بودن نور آفتاب در پاکیزگی بهتر لباس‌های شسته شده و همچنین زرد شدن و تغییر رنگ کاغذ و برخی از پارچه‌هایی که مدام در نور آفتاب قرار دارند وجود همین پرتو در نور خورشید می‌باشد.

تولید مصنوعی این پرتو با تخلیه الکتریکی در بخار جیوه در لامپ‌های مربوطه انجام می‌شود. مشخصه فیزیکی تخلیه الکتریکی در بخار جیوه، تولید چند طیف مشخص و ناپیوسته است که دو طیف ۱۸۵ و ۲۵۴ نانومتر آن در ناحیه پرتو ماوراء بنفش و بقیه در ناحیه مرئی قرار می‌گیرند. طول موج ۲۵۴ نانومتر بیش‌ترین شدت را نسبت به دیگر طول موج‌ها داشته و دارای خاصیت میکروب‌کشی است. بنابراین در اکثر فرآیندهای اکسایش پیشرفته از اشعه ماوراء بنفش که از لامپ‌های UV-C ساطع می‌شود به عنوان منبع نور استفاده می‌شود. لامپ‌های مولد پرتو ماوراء بنفش سه دسته‌اند:

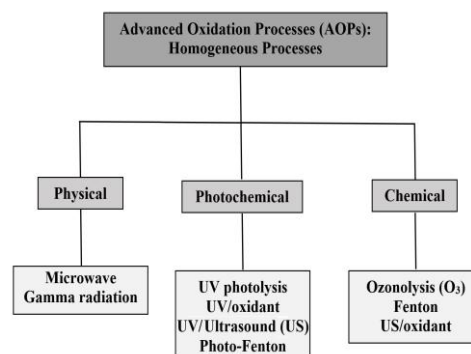
۱. لامپ‌های کم فشار

به دام افتاده و از طریق رادیکال‌های پراکسی و پراکسیدها منجر به پیشرفت و در نهایت کامل شدن فرآیند معدنی‌سازی می‌شوند (۶).

در مقاله مروری حاضر، مطالعه جامعی بر روی مهم‌ترین تحقیقات انجام شده در زمینه حذف آلودگی‌های محیطی توسط فرآیندهای فوتولیز و UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> صورت گرفته است.

### فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته همگن

فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته همگن را می‌توان به سه دسته شیمیایی، فیزیکی و فوتوشیمیایی تقسیم‌بندی نمود. در شکل (۱) به مهم‌ترین موارد هر شاخه اشاره شده است. در ادامه نیز به اصول و نتایج تحقیقات صورت گرفته بر روی فرآیندهای فوتولیز و UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> که از مهم‌ترین شاخه‌های فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته همگن فوتوشیمیایی می‌باشند، پرداخته خواهد شد (۷).



شکل (۱): انواع فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته همگن

### - فوتولیز با تابش اشعه ماوراء بنفش

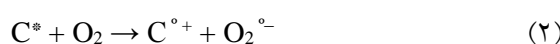
اشعه ماوراء بنفش<sup>۱</sup> (UV) به محدوده‌ای از امواج الکترومغناطیس اطلاق می‌شود که در ناحیه نامرئی طیف نوری، در محدوده طول موج ۴۰۰-۱۰۰ نانومتر قرار دارد و می‌تواند به ۴ ناحیه UV-A، UV-UV

<sup>۱</sup> Ultraviolet

۲. لامپ‌های با فشار متوسط

۳. لامپ‌های پر فشار

در اکثر سیستم‌های تصفیه آب با استفاده از پرتوهای ماوراء بنفش، برای تولید اشعه ماوراء بنفش UV-C از لامپ‌های کم فشار محتوی بخار جیوه استفاده می‌شود. در حدود ۹۰ درصد از طیف UV ساطع شده از این لامپ‌ها در محدوده میکروبوکشی یعنی طول موج ۲۵۴ نانومتر است. اشعه UV لامپ‌های بخار جیوه بوسیله عبور یک قوس الکتریکی از میان یک گاز بی‌اثر تولید می‌شود. لامپ‌ها از شیشه کوآرتز ساخته می‌شوند و معمولاً بوسیله یک پوشش کوآرتز اضافی از آب اطراف ایزوله می‌شوند. بازدهی لامپ‌های با فشار متوسط نسبت به انرژی مصرفی آن‌ها کم می‌باشد. در عوض توانایی نفوذ پرتو ساطع شده از آن‌ها به خاطر شدت بالای آن بیش‌تر از لامپ‌های کم فشار است (۷). به منظور حذف آلاینده‌های آلی بوسیله فوتولیز با تابش اشعه ماوراء بنفش، معمولاً از لامپ‌های UV-C استفاده می‌شود. در این فرآیند واکنش فوتواکسیداسیونی با تحریک الکترونی سوبسترای آلی (معادله (۱)) آغاز می‌شود و در ادامه انتقال الکترون از حالت تحریک شده یعنی C\* به حالت پایه اکسیژن مولکولی مطابق با معادله (۲) رخ داده و آنیون رادیکال سوپراکسید تشکیل می‌شود که گونه بسیار فعالی می‌باشد:



سرعت این فرآیند بستگی به سطح مقطع جذب نور<sup>۲</sup>، بهره کوانتایی<sup>۳</sup> فرآیند، سرعت فوتون در طول موج تحریک کننده و غلظت اکسیژن مولکولی محلول دارد (۷).

روش فوتولیز با تابش اشعه ماوراء بنفش برای حذف آروماتیک‌های نیترو و کلره، مواد رنگ‌زا، قارچ کش‌ها و سایر آلودگی‌های موجود در آب بکار برده شده است. اگر چه قوس‌های کم فشار جیوه برای مقاصد ضد عفونی کردن آب کاملاً موثر می‌باشند، با این وجود نتایج حاصله ثابت کرده است که این روش به تنهایی قادر به حذف موثر مواد آلی از آب نمی‌باشد (۸-۱۰).

- فوتولیز با تابش اشعه ماوراء بنفش در حضور یک اکسیدکننده (UV/Oxidant)

به منظور افزایش کارایی فرآیند فوتولیز با تابش اشعه ماوراء بنفش در حذف آلاینده‌های محیط زیست، از اشعه ماوراء بنفش به همراه ترکیبات اکسیدکننده قوی نظیر هیدروژن پراکسید (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)، پتاسیم پرسولفات (K<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub>) و .... استفاده می‌شود. فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> معروف‌ترین فرآیند از فرآیندهای UV/Oxidant می‌باشد. فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> به دلیل ارزان بودن و تولید مقادیر قابل توجهی از رادیکال‌های هیدروکسیل مورد توجه جدی محققین قرار گرفته و در طول دهه گذشته به عنوان یک روش تصفیه موثر، توسعه زیادی یافته است. این روش در حذف آلاینده‌های آلی مقاوم در برابر تجزیه بیولوژیکی بسیار موثر است. جذب فوتون توسط

<sup>2</sup> absorption cross section

<sup>3</sup> quantum yield

مکانیسم به سه گروه مختلف طبقه‌بندی نمود که در ادامه به آن اشاره شده است (۷).

رادیکال‌های هیدروکسیل عمدتاً ترکیبات آلی را از طریق گرفتن هیدروژن به رادیکال‌های آلی تبدیل می‌نمایند.



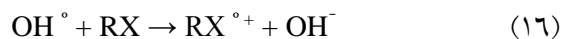
رادیکال‌های آلی در اثر واکنش با اکسیژن، رادیکال‌های پراکسیل را ایجاد می‌کنند. حد واسط‌های رادیکالی حاصله، یک سری واکنش تخریبی زنجیری را آغاز می‌نمایند، به طوری که در نهایت منجر به تبدیل آلاینده آلی به  $\text{CO}_2$  و سایر مواد بی‌ضرر می‌شوند.



افزایش الکتروفیلی رادیکال هیدروکسیل به سیستم  $\pi$  ترکیبات آلی، مکانیسمی دیگر برای تخریب اکسیداسیونی می‌باشد.



همچنین رادیکال‌های هیدروکسیل می‌توانند در انتقال الکترون از سوبسترای آلی شرکت کرده و آنیون‌های هیدروکسیل را تشکیل دهند.



اغلب مشاهده شده است که افزایش غلظت هیدروژن پراکساید سبب افزایش درصد حذف آلاینده‌ها می‌شود، اما بعد از غلظت خاصی که به غلظت بحرانی معروف است، غلظت‌های بالاتر هیدروژن پراکساید سرعت حذف آلاینده را افزایش نداده و حتی در برخی موارد سبب کاهش سرعت حذف می‌شوند (۱۳). اثر منفی حضور بیش از حد هیدروژن پراکساید، ناشی از نقش بازدارندگی آن در تشکیل رادیکال‌های هیدروکسیل است. از این رو

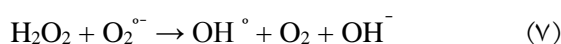
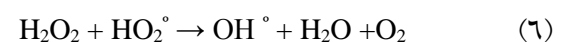
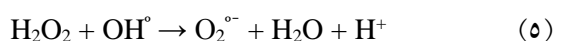
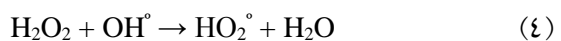
مولکول  $\text{H}_2\text{O}_2$  آن را به دو رادیکال هیدروکسیل تفکیک می‌کند. این رادیکال‌ها از طریق گرفتن هیدروژن و یا افزایش به پیوند دوگانه قادرند به مولکول‌های آلی حمله نموده و تحت شرایط عملیاتی مناسب، می‌توانند محصولات نهایی معدنی‌سازی نظیر آب،  $\text{CO}_2$  و اسیدهای معدنی را تولید نمایند (۱۱).

در مقالات علمی، مکانیسم‌های مختلفی برای فرآیند  $\text{UV}/\text{H}_2\text{O}_2$  پیشنهاد شده است. مکانیسمی که در بیشتر منابع نیز گزارش شده است شامل تولید رادیکال‌های فعال هیدروکسیل در اثر تابش نور  $\text{UV}$  به محلول  $\text{H}_2\text{O}_2$  می‌باشد. مکانیسم پیشنهادی برای فرآیند  $\text{UV}/\text{H}_2\text{O}_2$  را در سه مرحله واکنش‌های زیر می‌توان خلاصه کرد (۱۲):

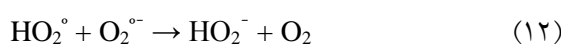
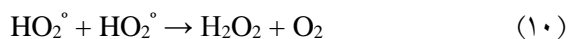
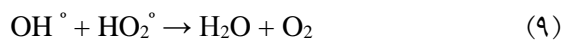
مرحله آغازین:



مرحله انتشار:



مرحله نهایی:



واکنش‌های رادیکال‌های هیدروکسیل ایجاد شده در حضور یک سوبسترای آلی را می‌توان از نظر

۲۴۰ نانومتر دارند بهره برد چرا که در این ناحیه ضریب جذب  $H_2O_2$  زیاد است (۱۶-۱۴).

- مروری بر مهم‌ترین تحقیقات صورت گرفته در فرآیند  $UV/H_2O_2$  کارایی فرآیند  $UV/H_2O_2$  در حذف انواع مختلفی از آلاینده‌های محیطی نظیر آلاینده‌های رنگزا، آلاینده‌های دارویی، مشتقات مختلف بنزن، فنل و آفت‌کش‌ها (علف‌کش‌ها، حشره‌کش‌ها، قارچ‌کش‌ها و ...) مورد بررسی قرار گرفته و نتایج قابل توجهی گزارش شده است.

در خصوص حذف آلاینده‌های رنگزا توسط فرآیند  $UV/H_2O_2$  تحقیقات متعددی صورت گرفته است. بهنژادی و همکارانش در سال ۲۰۰۴ (۱۲) کارایی فرآیند  $UV/H_2O_2$  در حذف اسید اورانژ<sup>۵</sup> (AO7) از محلول‌های آبی را مورد بررسی قرار دادند. AO7 یک رنگ مونوازو آنیونی است که در صنایع نساجی به وفور استفاده شده و پساب خروجی از این صنایع به طور قابل توجهی حاوی این ترکیب و ترکیبات مشابه آن می‌باشد.

آزمایش‌ها در یک فوتوراکتور ناپیوسته مجهز به یک لامپ UV-C، با توان ۳۰ وات انجام شد. منبع نور در قسمت فوقانی و در بالای مخزنی به حجم ۵۰۰ میلی‌لیتر تعبیه شده و تابش از سطح مورد استفاده قرار گرفت. کارایی فرآیند  $UV/H_2O_2$  در تخریب AO7 با فرآیند فوتولیز (استفاده تنها از تابش UV) و فرآیند استفاده تنها از هیدروژن پراکسید جهت اکسایش (بدون حضور تابش UV) مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد که در حالت

مقدار هیدروژن پراکسید باید به میزانی تنظیم شود که تقریباً تمام آن مورد مصرف قرار گیرد. غلظت مطلوب هیدروژن پراکسید در فرآیند  $UV/H_2O_2$  به پارامترهای متعددی نظیر غلظت آلاینده، نوع آلاینده، و pH وابسته بوده و باید برای هر پساب ویژه، بهینه‌سازی‌های لازم صورت گیرد.

فرآیند  $UV/H_2O_2$  چندین مزیت عمده دارد که عبارتند از (۱۳):

۱. تولید دو رادیکال هیدروکسیل از فوتولیز یک مولکول  $H_2O_2$ .
۲. در دسترس بودن اکسیدکننده و پایداری حرارتی آن.
۳. هزینه سرمایه‌گذاری کم.
۴. فرآیندی مقرون به صرفه، ایمن با روش عملیاتی ساده.
۵. عدم تشکیل لجن.
۶. زمان مورد نیاز کم و ۷. کاهش قابل ملاحظه<sup>۴</sup> COD

با وجود مزایای فوق، محدودیت‌هایی نیز در استفاده از فرآیند  $UV/H_2O_2$  وجود دارد. اولاً از آنجائیکه برای فوتولیز  $H_2O_2$  و تبدیل آن به رادیکال‌های هیدروکسیل نیاز به طول موج کم‌تر از ۲۸۰ نانومتر وجود دارد و از آنجائیکه چنین طول موج‌هایی در نور خورشیدی که به سطح زمین می‌رسد ناچیز است، کاربرد روش مذکور تحت تابش نور خورشید ( $Solar/H_2O_2$ ) برای حذف آلودگی‌های محیطی کارایی مناسبی نخواهد داشت. همچنین به دلیل ناحیه جذب نسبتاً کوچک  $H_2O_2$ ، بویژه در مواردی که ترکیبات آلی در ناحیه جذبی  $H_2O_2$  قادر به جذب اشعه UV باشند یک مشکل عمده ایجاد می‌کند. با این وجود در چنین مواقعی می‌توان از قوس‌های Xe-Hg که نشر مناسبی در ناحیه ۲۱۰ الی

<sup>5</sup> Acid Orange 7

<sup>4</sup> Chemical Oxygen Demand

غلظت اولیه آلاینده مورد مطالعه (AO7) بود. مشاهده شد که در غلظت ثابتی از هیدروژن پراکسید، با افزایش غلظت آلاینده کاهشی در میزان حذف ایجاد می‌شود. این اثر نیز این گونه توجیه گردید که ضریب جذب مولی AO7 در طول موج کم‌تر از ۲۶۰ نانومتر بسیار بالا می‌باشد، به طوری که افزایش در غلظت AO7 موجب یک اثر فیلتر داخلی می‌شود. در نتیجه محلول AO7 به نور UV نفوذ ناپذیرتر شده و راندمان حذف آلاینده کاهش می‌یابد.

پارامتر دیگر مورد بررسی تاثیر pH اولیه محلول در کارایی فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> در حذف AO7 بود. نتایج این تحقیق به وضوح نشان داد که شرایط قلیایی و خنثی به مراتب از شرایط اسیدی برای حذف آلاینده مورد نظر توسط فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> مفیدتر هستند.

در این تحقیق همچنین تاثیر حضور اتانول در کارایی فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> مورد بررسی قرار گرفت. ترکیباتی مانند اتانول به طور عمومی به عنوان جاروب کننده و غیر فعال کننده رادیکال‌های هیدروکسیل استفاده می‌شوند. نتایج این تحقیق نشان داد که با افزایش غلظت اتانول در محلول آزمایشی میزان حذف آلاینده به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. این نتایج به وضوح نقش موثر و کلیدی رادیکال‌های هیدروکسیل را در کارایی فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> به اثبات رساند.

جهت مقایسه تاثیر توان منابع نوری در کارایی فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> دو لامپ UV-C با توان‌های متفاوت (۳۰ و ۸ وات)، به عنوان منبع نوری استفاده شد. نتایج نشان داد که میزان حذف AO7 در حضور منبع تابش ۳۰ وات بسیار بیشتر از منبع تابش ۸

استفاده تنها از تابش UV و حالت استفاده تنها از H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> کاهش قابل توجهی در غلظت آلاینده رنگزا مشاهده نمی‌شود. ولی کاربرد همزمان تابش UV و H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> باعث کاهش چشمگیر در غلظت آلاینده رنگزا می‌شود. که این کاهش می‌تواند به تولید رادیکال‌های هیدروکسیل مربوط باشد، که یک عامل اکسنده قوی می‌باشند. در این تحقیق در ادامه تاثیر پارامترهای عملیاتی موثر در کارایی فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> از قبیل غلظت اولیه هیدروژن پراکسید و آلاینده مورد مطالعه (AO7)، pH محلول و توان منبع تابش در حذف آلاینده AO7 مورد بررسی قرار گرفت.

در بررسی تاثیر غلظت اولیه H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> در کارایی فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> مشخص شد که افزایش غلظت H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> با افزایش میزان حذف آلاینده AO7 همراه خواهد بود. ولی با افزایش غلظت H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> بالاتر از یک غلظت مشخص (غلظت بحرانی) افزایش قابل توجهی در میزان حذف مشاهده نمی‌شود. روند مشاهده شده به این صورت توجیه گردید که: با افزایش غلظت H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> رادیکال‌های هیدروکسیل بیشتری جهت حمله به حلقه‌های آروماتیکی در دسترس خواهد بود (مطابق با معادله ۳). در غلظت‌های بالاتر از غلظت بحرانی رادیکال‌های هیدروکسیل به طور موثر با مولکول‌های H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> مازاد واکنش داده و تولید رادیکال‌های هیدروپراکسیل را می‌کنند (مطابق با معادله ۴). رادیکال‌های هیدروپراکسیل نسبت به رادیکال‌های هیدروکسیل کم‌تر فعال بوده در نتیجه افزایش قابل توجهی در میزان حذف مشاهده نمی‌شود.

پارامتر دیگری که تاثیر آن در کارایی فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت

رادوکان<sup>۸</sup> و همکارانش در سال ۲۰۲۲ (۱۸) کارآیی فرآیندهای UV تنها، UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> و NaHCO<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> را در حذف رنگ‌های Fast Green FCF (FG) و Ponceau 4R (P4R) مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> در حذف هر دو آلاینده رنگزای فوق از محلول‌های آبی از فرآیند UV تنها و NaHCO<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> موثرتر است. در این تحقیق با استفاده از آنالیزهای HPLC-MS و شناسایی حدواسط‌های تشکیل شده مکانیسمی برای تخریب هر دو رنگ پیشنهاد گردید.

در جدول (۱) نتایج اصلی مهم‌ترین تحقیقات صورت گرفته شده در زمینه حذف آلاینده‌های رنگزا توسط فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> در سال‌های اخیر ارائه شده است. نتایج جدول (۱) به خوبی نشان می‌دهد فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> قادر به رنگزدایی کامل انواع مختلف آلاینده‌های رنگزا بوده و با افزایش زمان تابش نور میزان معدنی‌سازی نیز به طور چشمگیری قابل افزایش است. شرایط بهینه گزارش شده در این جدول برای حذف آلاینده‌های رنگزا به خوبی نشان می‌دهد که برای رسیدن به حذف مناسب، نسبت غلظت H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> به غلظت آلاینده رنگزا باید تقریباً در محدوده ۵۰ برابر باشد. منبع نور مناسب برای این فرآیند نیز منبع نور لامپ جیوه کم فشار با طول موج حداکثری ۲۵۴ نانومتر می‌باشد.

وات می‌باشد. نتایج این تحقیق نیز بیانگر نقش موثر توان منبع نور در کارآیی فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> بوده و نشان داد که بهتر است از منابع نوری با توان بیش‌تر برای حذف موثر آلاینده‌های محیطی بهره برده شود.

مدیرشها و بهنژادی در سال ۲۰۰۶ (۱۱) کارآیی فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> در حذف مالاشیت سبز<sup>۶</sup> (MG) از محلول‌های آبی را مورد بررسی قرار دادند. MG یک رنگ بازی کاتیونی است که در صنایع مختلف به وفور استفاده می‌شود. نتایج این تحقیق نشان داد که فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> می‌تواند به طور موثری برای حذف MG از محیط‌های آبی مورد استفاده قرار گیرد. در این تحقیق غلظت مطلوب هیدروژن پراکسید برای ۱۰ mg L<sup>-1</sup> از MG برابر با ۳۰۰ mg L<sup>-1</sup> گزارش گردید. مدل سینتیکی ارائه شده در این تحقیق و مکانیسم پیشنهادی برای تخریب آلاینده مورد مطالعه از نوآوری‌های جالب این تحقیق بود.

مدیرشها و همکارانش در سال ۲۰۱۲ (۱۷) کارآیی فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> در حذف اسید رد<sup>۷</sup> (AR88) از محلول‌های آبی را مورد بررسی قرار داده و محاسبات انرژی الکتریکی مورد نیاز برای فرآیند را انجام داده و گزارش نمودند. آن‌ها گزارش نمودند که انرژی الکتریکی مورد نیاز برای فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> با افزایش غلظت اولیه AR88 و pH افزایش می‌یابد در صورتیکه با افزایش غلظت اولیه H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> و شدت تابش نور فرابنفش تا یک مقدار مشخص، میزان انرژی الکتریکی مورد نیاز فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> کاهش می‌یابد.

<sup>6</sup> Malachite Green

<sup>7</sup> Acid Red 88

<sup>8</sup> Raducan



جدول (۱): نتایج اصلی مهم‌ترین تحقیقات صورت گرفته شده در زمینه حذف آلاینده‌های رنگزا توسط فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>

منبع	کارایی حذف	متغیرهای فرآیند	نام آلاینده رنگزا
(۱۹)	Decolorization = 100%	[Dye] = 100 mg L <sup>-1</sup> , [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 35%] = 4 mL/6 L, Lamp power = 1600 W, Irradiation time = 6 min	C.I. Reactive Red 120
(۲۰)	Decolorization = 100%	[Dye] = 500 mg L <sup>-1</sup> , [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] = 90 mM, Lamp power = 150 W (Wavelength = 200-280 nm), Irradiation time = 175 min	C.I. Reactive Black 5
(۲۱)	Decolorization = 100% Mineralization = 100%	[Dye] = 100 mg L <sup>-1</sup> , [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] = 1000 mg L <sup>-1</sup> , Lamp power = 120 W (Wavelength = 253.7 nm), Decolorization irradiation time = 20 min, Mineralization irradiation time = 120 min	Remazol Black B (C.I. Reactive Black 5)
(۲۲)	Decolorization = 100% TOC reduction = 82%	[Dye] = 40 mg L <sup>-1</sup> , [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] = 565.8 mg L <sup>-1</sup> , Lamp power = 125 W (Medium pressure Hg lamp), Decolorization irradiation time = 35 min, Mineralization irradiation time = 60 min	C.I. Direct Black 22
(۲۳)	Decolorization = 100% TOC reduction = 58.48%	[Dye] = 100 mg L <sup>-1</sup> , [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] = 24.5 mM, Lamp power = 15 W, Irradiation time = 60 min	C.I. Reactive Yellow 84
(۲۴)	Decolorization = 90% TOC reduction = 74%	[Dye] = 20 mg L <sup>-1</sup> , [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] = 116.32 mM, Lamp power = 560 W (16 low pressure Hg lamp, Wavelength = 253.7 nm, 35 W/lamp), pH = 8.9, Irradiation time = 30 min	C.I. Direct Blue 199
(۲۵)	TOC reduction = 80.2%	[Dye] = 20 mg L <sup>-1</sup> , [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] = 10 mM, Lamp power = 125 W (Wavelength = 254 nm), pH = 5.5, Irradiation time = 60 min	C.I. Reactive Blue 137
(۲۶)	Decolorization = 99%	[Dye] = 9 × 10 <sup>-5</sup> M, [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] = 10 <sup>-3</sup> M, Output UV radiation power = 23.37 W (Polychromatic UV lamp), Acidic pH, Irradiation time = 10 min	Indigo carmine dye (C.I. Acid Blue 74)
(۲۷)	Decolorization = 74.48%	[Dye] = 80 μM, [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] = 3.3 mM, UV lamp wavelength = 254 nm, pH = 10, Irradiation time = 30 min	C.I. Natural Red 4
(۲۸)	Decolorization = 100% TOC reduction = 95%	[Dye] = 17.5 mg L <sup>-1</sup> , [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] = 525 mg L <sup>-1</sup> , Lamp power = 15 W (Low pressure Hg lamp, Wavelength = 253.7 nm), Decolorization irradiation time = 25 min, Mineralization irradiation time = 120 min	C.I. Acid Orange 7
(۲۹)	Decolorization = 73%	[Dye] = 10 μM; [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] = 1.67 mM, pH = 7, Lamp power = 6 W (Wavelength = 254 nm), Irradiation time = 30 min	Rhodamine B (C.I. Basic Violet 10)
(۳۰)	COD reduction = 65%	[Dye] = 5 × 10 <sup>-2</sup> mM, [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] = 2.5 × 10 <sup>-3</sup> M, pH = 3, Irradiation time = 180 min, Lamp power = 20 W (Low pressure Hg lamp, Wavelength = 254 nm)	Eriochrome Red 3B (C.I. Mono sulphonic Mordant Red 73)
(۳۱)	Decolorization = 100%	[Dye] = 20 mg L <sup>-1</sup> , [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] = 1000 mg L <sup>-1</sup> , Lamp power = 30 W (UV-C), Distance from UV lamp = 16 cm, Irradiation time = 14 min	C.I. Basic Red 46
(۳۲)	Decolorization = 95.03%	[Dye] = 10 mg L <sup>-1</sup> , [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] = 1200 mg L <sup>-1</sup> , Lamp power = 30 W (UV-C), Distance from UV lamp = 6 cm, Irradiation time = 20 min	C.I. Basic Blue 3
(۳۲)	Decolorization = 98.16%	[Dye] = 10 mg L <sup>-1</sup> , [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] = 1200 mg L <sup>-1</sup> , Lamp power = 30 W (UV-C), Distance from UV lamp = 6 cm, Irradiation time = 20 min	C.I. Acid Green 25
(۳۳)	Decolorization = 100%	[Dye] = 7.8 × 10 <sup>-5</sup> M, [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] = 0.046 M, Light intensity = 1586 μW cm <sup>-2</sup> (Wavelength = 254 nm), Distance from UV lamp = 2 cm, Irradiation time = 3 min	Methyl Orange (C.I. Acid Orange 52)
(۳۴)	Decolorization = 93.51%	[Dye] = 20 mg L <sup>-1</sup> , [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] = 2000 mg L <sup>-1</sup> , Lamp power = 30 W (UV-C), Distance from UV lamp = 8 cm, Irradiation time = 10 min	C.I. Acid Blue 92

ادامه جدول (۱)

منبع	کارایی حذف	متغیرهای فرآیند	نام آلاینده رنگزا
(۳۴)	Decolorization = 99.50%	[Dye] = 20 mg L <sup>-1</sup> , [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] = 2000 mg L <sup>-1</sup> , Lamp power = 30 W (UV-C), Distance from UV lamp = 8 cm, Irradiation time = 10 min	C.I. Acid Black 1
(۳۵)	Decolorization = 92.72%	[Dye] = 250 mg L <sup>-1</sup> , [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] = 0.25 M, Lamp power = 8 W (UV-C), pH = 4.95, Temperature = 50 °C	Alizarin Yellow R (C.I. Mordant Orange 1)
(۳۶)	Decolorization = 98.8%	[Dye] = 2.5 μM, [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] = 50 μM, Lamp power = 300 W (Medium pressure Hg lamp, Wavelength = 365 nm), pH = 7, Irradiation time = 15 min	Rhodamine B (C.I. Basic Violet 10)

حداکثر حذف PhP (بیش از ۹۸٪) را به صورت، غلظت اولیه PhP کم‌تر از ۲۳ mg L<sup>-1</sup>، غلظت اولیه H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> بیش‌تر از ۴۷۰ mg L<sup>-1</sup>، حجم محلول کمتر از ۶ mL، pH نزدیک به ۲ و زمان تابش بیش از ۶ دقیقه نشان داد.

زین<sup>۶</sup> و همکارانش در سال ۲۰۲۰ (۳۸) کارایی فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> در حذف سولفادی‌متوکسین را از محلول‌های آبی مورد بررسی قرار دادند. آنتی‌بیوتیک‌های سولفونامید موجود در آب به دلیل پایداری و ظرفیت آن‌ها در ایجاد مقاومت میکروبی باعث نگرانی عمومی شده است. بنابراین در این تحقیق کارایی فوتولیز توسط نور ماوراء بنفش و فوتولیز همراه با هیدروژن پراکسید در حذف سولفادی‌متوکسین مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داد که ترکیب تابش نور ماوراء بنفش با هیدروژن پراکسید در حذف سولفادی‌متوکسین مؤثرتر از تابش به تنهایی یا سیستم UV/persulfate بود. در این تحقیق همچنین اثرات غلظت هیدروژن پراکسید، زمان واکنش و ترکیب ماتریس آب در کارایی فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> مورد ارزیابی قرار گرفت. راندمان حذف سولفادی‌متوکسین در غلظت‌های

در خصوص حذف ترکیبات دارویی توسط فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> نیز تحقیقات متعددی در سال‌های گذشته صورت گرفته است. سعید و همکارانش در سال ۲۰۱۸ (۳۷) کارایی فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> در حذف فنازوپیریدین (PhP) را از محلول‌های آبی در یک فوتوراکتور با جریان چرخشی ناپیوسته<sup>۱</sup> مورد بررسی قرار دادند. PhP به عنوان یک آلاینده محیط زیست از ترکیبات دارویی بوده و یک مسکن است که در اورولوژی استفاده می‌شود. وجود گروه آزو در ساختار آن، این ترکیب را در برابر تجزیه زیستی<sup>۲</sup> مقاوم می‌کند. در این تحقیق از روش رویه پاسخ<sup>۳</sup> (RSM) برای بهینه‌سازی حذف PhP استفاده گردیده و یک مدل ریاضی درجه دوم<sup>۴</sup> مابین پارامترهای عملیاتی و درصد حذف آلاینده مورد نظر گزارش گردید. تحلیل واریانس<sup>۵</sup> (ANOVA) مدل درجه دوم نشان داد که مدل ارزیابی شده بسیار معنادار است. مقادیر پیش‌بینی شده راندمان حذف PhP توسط مدل درجه دوم به طور قابل توجهی مطابق با مقادیر تجربی بوده و مدل ارزیابی شده شرایط بهینه برای

<sup>1</sup> batch re-circulated photoreactor<sup>2</sup> biodegradation<sup>3</sup> Response Surface Methodology<sup>4</sup> quadratic model<sup>5</sup> Analysis of Variance<sup>6</sup> Xin

بالای هیدروژن پراکسید کاهشی را نشان می‌دهد. در جدول (۲) نتایج اصلی مهم‌ترین تحقیقات همچنین افزایش pH محیط به شرایط قلیایی نیز سبب کاهش راندمان حذف آلاینده مذکور می‌شود. صورت گرفته شده در زمینه حذف ترکیبات دارویی از محیط‌های آبی توسط فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> در سال‌های اخیر ارایه شده است.

جدول (۲): نتایج اصلی مهم‌ترین تحقیقات صورت گرفته شده در زمینه حذف ترکیبات دارویی توسط فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>

منبع	کارایی حذف	متغیرهای فرآیند	نام ترکیبات دارویی
(۳۹)	Removal = 94%	[CFA] = $1 \times 10^{-3}$ M, [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] = 1 M, pH = 5, Lamp power = 17 W (Low pressure Hg lamp, Wavelength = 254 nm), Irradiation time = 60 min	Clofibric acid (CFA)
(۴۰)	TOC reduction = 35%	[CBZ] = $2 \times 10^{-2}$ mM, [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] = 5 mM, pH = 5, Lamp power = 17 W (Low pressure Hg lamp, Wavelength = 254 nm), Irradiation time = 4 min	Carbamazepine (CBZ)
(۴۱)	Removal = 98%	[CTB] = 10 mg L <sup>-1</sup> , [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] = 1000 μM, pH = 7, Lamp power = 700 W (Medium pressure Hg lamp, Wavelength = 238-334 nm), Irradiation time = 120 min	Cytarabine (CTB)
(۴۲)	TOC reduction = 50%	[AMX] = 100 μM, [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] = 10 mM, pH = 7, Photon fluence rate = 0.38 W L <sup>-1</sup> (Low pressure Hg lamp, Wavelength = 254 nm), Irradiation time = 80 min	Amoxicillin (AMX)
(۴۳)	TOC reduction = 40.65 ± 5.1%	[CBZ] = 4.2 μM, [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] = 10 mM, pH = 2-8, Lamp power = 30 W (Medium pressure Hg lamp - UV dose = 172 mJ cm <sup>-2</sup> ), Irradiation time = 15 min	Carbamazepine (CBZ)
(۴۴)	TOC reduction = 72.06%	[CBZ] = 21.16 μM, [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] = 1 mM, pH = 5.74, Lamp power = 75 W (Low pressure Hg lamp - Light intensity = 153 μW cm <sup>-2</sup> , Wavelength = 253.7 nm), Irradiation time = 240 min	Carbamazepine (CBZ)
(۴۵)	Removal = 98%	[CAP] = 20 mg L <sup>-1</sup> , [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] = 3 mmol, Lamp power = 30 W (UVC, Wavelength = 254 and 290-390 nm), Irradiation time = 90 min	Chloramphenicol (CAP)
(۴۶)	TOC reduction = 50%	[CAP] = 20 mg L <sup>-1</sup> , [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] = 35 mM, pH = 5.5, Lamp power = 6 W (Wavelength = 254 nm, Light intensity = 600 μW cm <sup>-2</sup> ), Irradiation time = 50 min	Chloramphenicol (CAP)
(۴۷)	Removal = 100%	[SMX] = 10 mg L <sup>-1</sup> , [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] = 100 mg L <sup>-1</sup> , pH = 4.8, Lamp power = 200 W (Polychromatic medium-pressure Hg lamp, Wavelength = 255-579 nm), Irradiation time = 10 min	Sulfamethoxazole (SMX)
(۴۸)	Removal = 100%	[NFX] = 15 mg L <sup>-1</sup> , [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] = 2.1 mM, pH = 7, Lamp power = 6 W (Low pressure Hg lamp, Wavelength = 254 nm), Irradiation time = 100 min	Norfloxacin (NFX)
(۴۹)	Removal = 90% TOC reduction = 43%	[AMX] = 25 mg L <sup>-1</sup> , [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] = 558 mg L <sup>-1</sup> , Lamp power = 21 W (Low pressure Hg lamp, Wavelength = 254 nm, UV fluence rate = $4.86 \times 10^{-6}$ Einstein m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ), Irradiation time = 67 min	Amoxicillin (AMX)
(۵۰)	Removal = 100%	[SPY] = 20 mg L <sup>-1</sup> , [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] = 700 mg L <sup>-1</sup> , Lamp power = 15 W (Low pressure Hg lamp, Wavelength = 253.4 nm), Irradiation time = 180 min	Sulfapyridine (SPY)

ادامه جدول (۲)

منبع	کارایی حذف	متغیرهای فرآیند	نام ترکیبات دارویی
(۵۱)	Removal = 66%	[CIP] = 30 μM, [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] = 300 μM, Irradiation intensity = 0.023 mW cm <sup>-2</sup> (UV-LED, Wavelength = 280 nm), Irradiation time = 60 min	Ciprofloxacin (CIP)
(۵۲)	Removal = 72%	[NFX] = 150 mg L <sup>-1</sup> , [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] = 200 mg L <sup>-1</sup> , Lamp power = 250 W (Low pressure Hg lamp, Wavelength = 365 nm), Irradiation time = 210 min	Norfloxacin (NFX)
(۵۳)	Removal = 85%	[GFX] = 200 mg L <sup>-1</sup> , [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] = 200 mg L <sup>-1</sup> , pH = 7, Lamp power = 250 W (Low pressure Hg lamp, Wavelength = 365 nm), Irradiation time = 180 min	Gemifloxacin (GFX)
(۵۴)	TOC reduction = 40%	[TAP] = 50 μM, [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] = 5 mM, pH = 7 with 1 mM phosphate buffer, Lamp power = 20 W (Wavelength = 254 nm), Irradiation time = 120 min	Thiamphenicol (TAP)
(۵۵)	Removal = 100%	[CIP] = 0.03 mM, [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] = 100 mM, Lamp power = 6 W (UV-C, Wavelength = 280 nm), Irradiation time = 40 min	Ciprofloxacin (CIP)
(۵۶)	Removal = 100%	[SMT] = 5 mg L <sup>-1</sup> , [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] = 10 mM, Lamp power = 8 W (2 low pressure Hg lamps, Wavelength = 254 nm), Irradiation time = 10 min	Sulfamethazine (SMT)
(۵۷)	Removal = 90%	[ACE] = 90 μM, [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] = 11.8 mM, pH = 5, Lamp power = 55 W (Wavelength = 253.7 nm), Irradiation time = 30 min	Acetamiprid (ACE)
(۵۸)	Removal = 76%	[AZM] = 2 mg L <sup>-1</sup> , [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] = 10 mg L <sup>-1</sup> , pH = 3, Lamp power = 8 W (Low pressure Hg lamps, Wavelength = 254 nm, Light intensity = 1.02 mW cm <sup>-2</sup> ), Irradiation time = 60 min	Azithromycin (AZM)
(۵۹)	Removal = 100% TOC reduction = 58%	[CFT] = 10 mg L <sup>-1</sup> , [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] = 10 mg L <sup>-1</sup> , pH = 5, Lamp power = 9 W (Low pressure Hg lamp, Wavelength = 254 nm, Light intensity = 2.2 mW cm <sup>-2</sup> ), Irradiation time = 120 min	Ceftriaxone (CFT)
(۶۰)	Removal = 100%	[CPX] = 2 mg L <sup>-1</sup> , [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] = 6.9 mg L <sup>-1</sup> , pH = 3, Xenon lamp (Light spectrum similar to the sun, Light intensity = 500 W m <sup>-2</sup> ), Irradiation time = 50 min	Cephalexin (CPX)
(۶۱)	Removal = 96%	[LEV] = 5 mg L <sup>-1</sup> , [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] = 150 μM, pH = 3, Lamp power = 25 W (UV Hg lamp, Wavelength = 254 nm), Irradiation time = 30 min	Levofloxacin (LEV)
(۶۱)	Removal = 94%	[OFLO] = 5 mg L <sup>-1</sup> , [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] = 150 μM, pH = 3, Lamp power = 25 W (UV Hg lamp, Wavelength = 254 nm), Irradiation time = 30 min	Ofloxacin (OFLO)
(۶۲)	Removal = 99.94%	[NIF] = 5 mg L <sup>-1</sup> , [H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] = 0.52 mM, pH = 7, Lamp power = 25 W (Wavelength = 254 nm), Irradiation time = 5 min	Nifedipine (NIF)

دارویی توسط فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> بسیار قابل توجه نمی‌باشد. به نظر می‌رسد برای داشتن معدنی‌سازی مناسب نیاز به تحقیقات بیشتر و بررسی توانایی سایر اکسیدکننده‌ها می‌باشد. در مقایسه با آلاینده‌های

نتایج جدول (۲) مشخصاً کارایی قابل ملاحظه فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> در حذف انواع مختلف آلاینده‌های دارویی را نشان می‌دهد. با این حال میزان حذف TOC و در واقع میزان معدنی‌سازی آلاینده‌های

از محلول‌های آبی مورد بررسی قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که pH مطلوب برای حذف BP-3 در فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> برابر با ۶ می‌باشد و افزایش غلظت هیدروژن پراکسید به طور خطی سبب افزایش سرعت حذف BP-3 می‌شود.

در خصوص حذف آلاینده‌های مربوط به آفت‌کش‌ها (علف‌کش‌ها، حشره‌کش‌ها، قارچ‌کش‌ها و ...) توسط فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> نیز تحقیقات جالبی در سال‌های گذشته صورت گرفته است. لویز-آلوارز<sup>۴</sup> و همکارانش در سال ۲۰۱۶ (۶۵) تخریب و حذف دو آفت‌کش کربوفوران (CBF) و یوپرودین (IPR) را توسط فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق تاثیر دو پارامتر عملیاتی، غلظت H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> و pH اولیه، و همچنین برهمکنش آن‌ها، در راندمان حذف مورد بررسی و بهینه‌سازی قرار گرفت. هر دو آفت‌کش به طور کامل توسط سیستم UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> تحت شرایط بهینه حذف شدند. با این حال، تفاوت‌های قابل‌توجهی مشاهده گردید: تخریب CBF تحت تاثیر هر دو پارامتر و برهمکنش آنها قرار گرفت، در حالی که تخریب IPR تحت تاثیر pH اولیه قرار نگرفت. جالب توجه است، تجزیه و تحلیل مسیرهای تخریب، تاثیر عمده فرآیند فوتولیز و اکسیداسیون ناشی از هیدروژن پراکسید را در تخریب CBF نشان داد، در حالی که ترکیب این دو هم‌افزایی قابل‌توجهی در تخریب IPR نشان دادند. حذف مخلوطی از هر دو آفت‌کش نیز توسط فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> مورد بررسی قرار گرفت که در آن حذف کمتری برای IPR مشاهده شد در حالی که میزان حذف CBF تحت تاثیر قرار نگرفت. ۹۰ درصد از

رنگزا، نسبت غلظت H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> به غلظت آلاینده دارویی در شرایط بهینه در اکثر تحقیقات به مراتب کم‌تر گزارش گردیده است. این مساله می‌تواند ناشی از محیط شفاف آلاینده‌های دارویی در مقایسه با آلاینده‌های رنگزا باشد. مقادیر pH مطلوب گزارش شده برای اکثر آلاینده‌های دارویی در محدوده pH خنثی و یا اسیدی می‌باشد و منبع نور استفاده شده در اکثر تحقیقات لامپ‌های جیوه کم فشار با طول موج حداکثری ۲۵۴ نانومتر می‌باشد.

در خصوص حذف آلاینده‌های فنلی توسط فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> نیز تحقیقات قابل توجهی در سال‌های گذشته صورت گرفته است. دانشور و همکارانش در سال ۲۰۰۷ (۶۳) کارایی فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> در حذف ۴-نیتروفنل (4-NP) را از محلول‌های آبی مورد بررسی قرار دادند. مشتقات نیتروفنل‌ها جزو آلاینده‌های مقاوم محسوب می‌شوند که در پساب‌های صنایع مختلف وجود دارند. نتایج این تحقیق نشان داد که فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> می‌تواند به طور کامل 4-NP را از محیط‌های آبی حذف نماید. در این تحقیق غلظت مطلوب هیدروژن پراکسید برای ۲۰ mg L<sup>-1</sup> از 4-NP برابر با ۷۰۰ mg L<sup>-1</sup> گزارش گردید. در این تحقیق حدواسط‌های فرآیند تخریب 4-NP هیدروکینون<sup>۱</sup> و ۴-نیتروکاتکول<sup>۲</sup> شناسایی گردید و بر این اساس یک مکانیسم پیشنهادی برای تخریب 4-NP ارائه گردید.

لی<sup>۳</sup> و همکارانش در سال ۲۰۲۱ (۶۴) کارایی فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> در حذف بنزوفنون-۳ (BP-3) را

<sup>۱</sup> hydroquinone

<sup>۲</sup> 4-nitrocatechol

<sup>۳</sup> Lee

<sup>۴</sup> Lopez-Alvarez

اکسیژن مورد نیاز شیمیایی (COD) حذف شد و ۷۵ درصد معدنی‌سازی پس از تصفیه مخلوط حاصل شد. تقریباً ۹۲ درصد از سمیت نیز توسط این فرایند حذف شد و نشان داد این روش می‌تواند فرآیندی امیدوارکننده برای تصفیه مخلوط‌های سمی این آفت‌کش‌ها باشد.

آداک<sup>۱</sup> و همکارانش در سال ۲۰۱۹ (۶۶) کارآیی فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> در حذف ۴ و ۲-دی‌کلروفنوکسی استیک اسید را از محلول‌های آبی مورد بررسی قرار دادند. یکی از پرمصرف‌ترین علف‌کش‌ها در جهان، ۲،۴-دی‌کلروفنوکسی استیک اسید (2,4-D) است. به طور خاص، 2,4-D برای تنظیم رشد گیاهان و کنترل علف‌های هرز استفاده می‌شود. علاوه بر این، 2,4-D نسبتاً سمی و بالقوه سرطان‌زا می‌باشد. قرار گرفتن در معرض دوزهای خوراکی منجر به اثرات نامطلوب روی چشم‌ها، تیروئید، کلیه‌ها و تخمدان‌ها شده است. چندین گزارش در منابع نشان می‌دهد که 2,4-D بر روی آبزیان تأثیر منفی می‌گذارد، اکوسیستم را مختل می‌کند و به دلیل زیست‌تخریب‌پذیری کم در محیط باقی می‌ماند. بنابراین در این تحقیق کارایی فوتولیز توسط نور ماوراء بنفش و فوتولیز همراه با هیدروژن پراکسید در حذف 2,4-D مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داد که فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>، بیش از ۹۷ درصد از 2,4-D را با تابشی با انرژی ۶۷۸ mJ cm<sup>-2</sup> و ۲/۵ mol H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> به ازاء هر مول 2,4-D را حذف می‌کند. نتایج این تحقیق نشان داد که غلظت اولیه 2,4-D، pH و غلظت نیترات بر میزان حذف 2,4-D تأثیر می‌گذارد. ثابت سرعت ظاهری

برای تخریب 2,4-D در غلظت‌های بالاتر 2,4-D کاهش قابل توجهی را از خود نشان داد. ثابت سرعت شبه مرتبه اول ظاهری با افزایش pH از ۴ به ۸ با ضریب ۱/۷ کاهش یافته و اثر مشابهی برای غلظت نیترات تا ۱ میلی‌مولار مشاهده گردید. در مجموع، این نتایج نشان دهنده اهمیت کیفیت آب/فاضلاب در معیارهای تصفیه است. به طور کلی، نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> تبدیل سریع و کارآمد 2,4-D به محصولات زیست‌تخریب‌پذیر را با موفقیت انجام می‌دهد به طوریکه محصولات حاصله می‌توانند از طریق سیستم‌های بیولوژیکی معمولی به راحتی از محیط حذف شوند.

آنجلی<sup>۲</sup> و همکارانش در سال ۲۰۲۱ (۶۷) کارآیی فرآیندهای فوتولیز UV و UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> در حذف کلرپیریفوس (CP) از محلول‌های آبی را مورد بررسی قرار دادند. CP یک آفت‌کش رایج بوده و بطور قابل توجهی مصرف می‌شود. تخریب نوری با ۲۰۰ میکروگرم در لیتر CP تجاری به مدت ۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰، ۲۴۰، ۳۶۰ و ۴۸۰ دقیقه انجام شد. میزان تخریب پس از ۳۰ دقیقه واکنش برای فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> و فوتولیز UVC به ترتیب ۹۸ و ۹۹ درصد گزارش گردید. علاوه بر این، در طول تصفیه، محصول جانبی اصلی CP، کلرپیریفوس اوکسون (CPO)، در میان سایر محصولات جانبی ناشناخته شناسایی شد. بررسی‌های اکوتوکسیکولوژیکی با A. aegypti هیچ گونه اثر سمی در نمونه‌های تحت تصفیه با فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> در ۶۰، ۹۰، ۱۲۰ و ۴۸۰ دقیقه تخریب نشان نداد. علیرغم تشکیل CPO پس

<sup>۱</sup> Adak<sup>۲</sup> Angeli

برای PRO در طی هر دو فرآیند پیشنهاد شد. واکنش‌های اصلی در هر دو فرآیند، شامل شکافت حلقه و هیدروکسیلاسیون توسط رادیکال‌های هیدروکسیل بود. آزمایش سمیت سنجی با *Vibrio fischeri* نشان داد که سمیت محلول واکنش ابتدا افزایش یافته، سپس به تدریج در طول فوتولیز UV کاهش می‌یابد، فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> در ابتدا سمیت را در ۱۰ دقیقه به دلیل تولید TP افزایش داده، اما قادر است سمیت را به طور کامل با پیشرفت واکنش حذف نماید. نتایج به‌دست‌آمده در این مطالعه نشان داد که فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> یک روش مؤثر برای از بین بردن PRO، TP، های آن و سمیت ناشی از آن در آب می‌باشد.

### نتیجه‌گیری

فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته یک تصفیه قدرتمند برای حذف آلاینده‌های مقاوم و سمی موجود در فاضلاب است. با ترکیب پراکسید هیدروژن و اشعه فرابنفش و بهینه‌سازی شرایط عملیاتی می‌توان به حذف قابل توجهی از آلاینده‌های آلی دست پیدا نمود. نتایج تحقیقات به خوبی نشان می‌دهد فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> قادر به رنگزدایی کامل انواع مختلف آلاینده‌های رنگزا بوده و با افزایش زمان تابش نور میزان معدنی‌سازی نیز به طور چشمگیری قابل افزایش است. نتایج تحقیقات حذف انواع مختلف آلاینده‌های دارویی، مشخصاً کارآیی قابل ملاحظه فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> را نشان می‌دهد. با این حال میزان معدنی‌سازی آلاینده‌های دارویی توسط فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> بسیار بالا نمی‌باشد. بنابراین به نظر می‌رسد برای داشتن معدنی‌سازی مناسب در

از فوتولیز با UVC از ۶۰ دقیقه به بعد، هیچ سمیتی تأیید نشد، که نشان می‌دهد محصولات جانبی تولید شده بر روی این ارگانسیم سمی نیستند.

هونگ<sup>۱</sup> و همکارانش در سال ۲۰۲۲ (۱۰) کارآیی فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> در حذف پروپیکونازول (PRO) از محلول‌های آبی را مورد بررسی قرار دادند. PRO یک قارچ‌کش تری‌آزول است که اغلب در آب شناسایی می‌شود. در این تحقیق، سینتیک و مکانیسم تخریب PRO در طول فرآیندهای فوتولیز UV و UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که PRO مطابق با سینتیک شبه مرتبه اول در هر دو فرآیند حذف می‌شود. حذف PRO با افزایش غلظت H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> در فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> افزایش یافته و بیشترین حذف در شرایط خنثی و حذف کمتر PRO در pH اسیدی و قلیایی مشاهده گردید. وجود ترکیباتی در آب مانند کلراید، نیترات، هیومیک اسید به عنوان جاروب کننده<sup>۲</sup> رادیکال عمل می‌کنند، اما یون بیکربنات می‌تواند هم به عنوان تسریع کننده<sup>۳</sup> تولید رادیکال و هم به عنوان جاروب کننده در فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> عمل می‌کند. در این تحقیق همچنین محصولات تبدیل PRO (TPs<sup>۴</sup>) در طول هر دو فرآیند شناسایی شدند. علاوه بر TPهای شناسایی شده، محصولات جانبی یونی، مانند کلراید، نیترات، فرمات و استات نیز شناسایی شدند، که نشان می‌دهند معدنی‌سازی قابل توجهی در فرآیند UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> به دست آمده است. بر اساس TPهای شناسایی شده و محصولات جانبی یونی، مکانیسم‌های تخریبی نیز

<sup>1</sup> Hong

<sup>2</sup> scavenger

<sup>3</sup> promoter

<sup>4</sup> transformation products

photolysis processes, *Chemosphere*, 302, 134876.

[11] Modirshahla, N., Behnajady, M.A., 2006, Photooxidative degradation of Malachite Green (MG) by UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>: Influence of operational parameters and kinetic modeling, *Dyes and Pigments*, 70, 54.

[12] Behnajady, M.A., Modirshahla, N., Shokri, M., 2004, Photodestruction of Acid Orange 7 (AO7) in aqueous solutions by UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>: Influence of operational parameters, *Chemosphere*, 55, 129.

[13] Daneshvar, N., Rabbani, M., Modirshahla, N., Behnajady, M.A., 2004, Critical effect of hydrogen peroxide concentration in photochemical oxidative degradation of C.I. Acid Red 27 (AR27), *Chemosphere*, 56, 895

[14] Saeid, S., Behnajady, M.A., 2015, Photooxidative removal of phenazopyridine by UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> process in a batch re-circulated annular photoreactor: Influence of operational parameters, *Oriental Journal of Chemistry*, 31, 1211.

[15] Daneshvar, N., Salari, D., Behnajady, M.A., 2002, Decomposition of anionic sodium dodecylbenzene sulfonate by UV/TiO<sub>2</sub> and UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> processes: A comparison of reaction rates, *Iranian Journal of Chemistry & Chemical Engineering*, 21, 55.

[16] Basturk, E., Karatas, M., 2015, Decolorization of anthraquinone dye Reactive Blue 181 solution by UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> process, *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 299, 67.

[17] Modirshahla, N., Behnajady, M.A., Rahbarfam, R., Hassani, A., 2012, Effects of operational parameters on decolorization of C.I. Acid Red 88 by UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> process: Evaluation of electrical energy consumption, *Clean - Soil, Air, Water*, 40, 298.

[18] Raducan, A., Bogdan, D., Galaon, T., Oancea, P., 2022, Oxidative removal of Fast Green FCF and Ponceaux 4R dyes by H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/NaHCO<sub>3</sub>, UV and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/UV processes: A comparative study, *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 431, 114040.

[19] Majcen-Le Marechal, A., Slokar, Y.M., Taufer, T., 1997, Decoloration of

حذف آلاینده‌های دارویی نیاز به تحقیقات بیش‌تر و بررسی توانایی سایر اکسیدکننده‌ها می‌باشد.

## تعارض منافع

نویسنده هیچ‌گونه تعارض منافی برای اعلام ندارد.

## منابع

[1] Crittenden, J.C., Trussell, R.R., Hand, D.W., Howe, K.J., Tchobanoglous, G., *MWH's Water treatment: Principles and design*. John Wiley & Sons, 2012.

[2] Drewes, J.E., Khan, S.J., *Water quality & treatment: A handbook on drinking water*. New York: McGraw-Hill, 2011.

[3] Daneshvar, N., Salari, D., Khataee, A.R., 2004, Photocatalytic degradation of azo dye acid red 14 in water on ZnO as an alternative catalyst to TiO<sub>2</sub>, *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 162, 317.

[4] Behnajady, M.A., Modirshahla, N., Daneshvar, N., Rabbani, M., 2007, Photocatalytic degradation of C.I. Acid Red 27 by immobilized ZnO on glass plates in continuous-mode, *Journal of Hazardous Materials*, 140, 257.

[5] Hoffmann, M.R., Martin, S.T., Choi, W., Bahnemann, D.W., 1995, Environmental applications of semiconductor photocatalysis, *Chemical Reviews*, 95, 69.

[6] Eskandarloo, H., Badiei, A., Behnajady, M.A., 2015, Optimization of UV/inorganic oxidants system efficiency for photooxidative removal of an azo textile dye, *Desalination and Water Treatment* 55, 226.

[7] Legrini, O., Oliveros, E., Braun, A.M., 1993, Photochemical processes for water treatment, *Chemical Reviews*, 93, 671.

[8] Al mamoni, F., Sans, C., Esplugas, S., 2004, A comparative study of the advanced oxidation of 2,4 - dichlorophenol, *Journal of Hazardous Materials*, 107, 123.

[9] Behnajady, M.A., Modirshahla, N., Fathi, H., 2006, Kinetics of decolorization of an azo dye in UV alone and UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> processes, *Journal of Hazardous Materials*, 136, 816.

[10] Hong, A., Lee, J., Cha, Y., Zoh, K.-D., 2022, Propiconazole degradation and its toxicity removal during UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and UV



- water using  $H_2O_2/UV$  and photo-Fenton treatment, *Journal of Hazardous Materials*, 174, 352.
- [31] Khataee, A.R., Habibi, B., 2010, Photochemical oxidative decolorization of C. I. basic red 46 by  $UV/H_2O_2$  process: Optimization using response surface methodology and kinetic modeling, *Desalination and Water Treatment*, 16, 243.
- [32] Kasiri, M.B., Khataee, A.R., 2011, Photooxidative decolorization of two organic dyes with different chemical structures by  $UV/H_2O_2$  process: Experimental design, *Desalination*, 270, 151.
- [33] Haji, S., Benstaali, B., Al-Bastaki, N., 2011, Degradation of methyl orange by  $UV/H_2O_2$  advanced oxidation process, *Chemical Engineering Journal*, 168, 134.
- [34] Kasiri, M.B., Khataee, A.R., 2012, Removal of organic dyes by  $UV/H_2O_2$  process: modelling and optimization, *Environmental Technology*, 33, 1417.
- [35] Narayanasamy, L., Murugesan, T., 2014, Degradation of Alizarin Yellow R using  $UV/H_2O_2$  advanced oxidation process, *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 33, 482.
- [36] Ding, X., Gutierrez, L., Croue, J.-P., Li, M., Wang, L., Wang, Y., 2020, Hydroxyl and sulfate radical-based oxidation of RhB dye in  $UV/H_2O_2$  and  $UV/persulfate$  systems: Kinetics, mechanisms, and comparison, *Chemosphere*, 253, 126655.
- [37] Saeid, S., Behnajady, M.A., Tolvanen, P., Salmi, T., 2018, Optimization of photooxidative removal of phenazopyridine from water, *Russian Journal of Physical Chemistry A*, 92, 876.
- [38] Xin, X., Sun, S., Zhou, A., Wang, M., Song, Y., Zhao, Q., Jia, R., 2020, Sulfadimethoxine photodegradation in  $UV-C/H_2O_2$  system: Reaction kinetics, degradation pathways, and toxicity, *Journal of Water Process Engineering*, 36, 101293.
- [39] Andreozzi, R., Caprio, V., Marotta, R., Radovnikovic, A., 2003, Ozonation and  $H_2O_2/UV$  treatment of clofibric acid in water: a kinetic investigation, *Journal of Hazardous Materials*, 103, 233.
- [40] Vogna, D., Marotta, R., Andreozzi, R., Napolitano, A., D'ischia, M., 2004, Kinetic and chemical assessment of the  $UV/H_2O_2$  chlorotriazine reactive azo dyes with  $H_2O_2/UV$ , *Dyes and Pigments*, 33, 281.
- [20] El-Dein, A.M., Libra, J.A., Wiesmann, U., 2001, Kinetics of decolorization and mineralization of the azo dye reactive black 5 by hydrogen peroxide and UV light, *Water Science and Technology*, 44, 295.
- [21] Georgiou, D., Melidis, P., Aivasidis, A., Gimouhopoulos, K., 2002, Degradation of azo-reactive dyes by ultraviolet radiation in the presence of hydrogen peroxide, *Dyes and Pigments*, 52, 69.
- [22] Cisneros, R.L., Espinoza, A.G., Litter, M.I., 2002, Photodegradation of an azo dye of the textile industry, *Chemosphere*, 48, 393.
- [23] Neamtu, M., Siminiceanu, I., Yediler, A., Kettrup, A., 2002, Kinetics of decolorization and mineralization of reactive azo dyes in aqueous solution by the  $UV/H_2O_2$  oxidation, *Dyes and Pigments*, 53, 93.
- [24] Shu, H.-Y., Chang, M.-C., 2005, Decolorization and mineralization of a phthalocyanine dye C.I. Direct Blue 199 using  $UV/H_2O_2$  process, *Journal of Hazardous Materials*, 125, 96.
- [25] Kusic, H., Koprivanac, N., Loncaric-Bozic, A., Papic, S., Peternel, I., Vujevic, D., 2006, Reactive dye degradation by AOPs; Development of a kinetic model for  $UV/H_2O_2$  process, *Chemical and Biochemical Engineering Quarterly*, 20, 293.
- [26] Rodríguez, E., Peche, R., Merino, J.M., Camarero, L.M., 2007, Decoloring of aqueous solutions of indigocarmine dye in an acid medium by  $H_2O_2/UV$  advanced oxidation, *Environmental Engineering Science*, 24, 363.
- [27] Abdullah, F.H., Rauf, M.A., Ashraf, S.S., 2007, Kinetics and optimization of photolytic decoloration of carmine by  $UV/H_2O_2$ , *Dyes and Pigments*, 75, 194.
- [28] Aleboyeh, A., Olya, M.E., Aleboyeh, H., 2008, Electrical energy determination for an azo dye decolorization and mineralization by  $UV/H_2O_2$  advanced oxidation process, *Chemical Engineering Journal*, 137, 518.
- [29] Alhamedi, F.H., Rauf, M.A., Ashraf, S.S., 2009, Degradation studies of Rhodamine B in the presence of  $UV/H_2O_2$ , *Desalination*, 239, 159.
- [30] Elmorsi, T.M., Riyad, Y.M., Mohamed, Z.H., Abd El Bary, H.M.H., 2010, Decolorization of Mordant red 73 azo dye in

- [50] García-Galán, M.J., Anfruns, A., Gonzalez-Olmos, R., Rodriguez-Mozaz, S., Comas, J., 2016, Advanced oxidation of the antibiotic sulfapyridine by UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>: Characterization of its transformation products and ecotoxicological implications, *Chemosphere*, 147, 451.
- [51] Ou, H.-S., Ye, J.-S., Ma, S., Wei, C.-H., Gao, N.-Y., He, J.-Z., 2016, Degradation of ciprofloxacin by UV and UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> via multiple-wavelength ultraviolet light-emitting diodes: Effectiveness, intermediates and antibacterial activity, *Chemical Engineering Journal*, 289, 391.
- [52] Shankaraiah, G., Poodari, S., Bhagawan, D., Himabindu, V., Vidyavathi, S., 2016, Degradation of antibiotic norfloxacin in aqueous solution using advanced oxidation processes (AOPs) – A comparative study, *Desalination and Water Treatment*, 57, 27804.
- [53] Shankaraiah, G., Saritha, P., Bhagawan, D., Himabindu, V., Vidyavathi, S., 2017, Photochemical oxidation of antibiotic gemifloxacin in aqueous solutions – A comparative study, *South African Journal of Chemical Engineering*, 24, 8.
- [54] Wang, F., Wang, W., Yuan, S., Wang, W., Hu, Z.-H., 2017, Comparison of UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and UV/PS processes for the degradation of thiamphenicol in aqueous solution, *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 348, 79.
- [55] Wang, F., Wang, W., Yuan, S., Wang, W., Hu, Z.-H., 2018, Removal of ciprofloxacin using modified advanced oxidation processes: Kinetics, pathways and process optimization, *Journal of Cleaner Production*, 171, 1203.
- [56] Lin, C.-C., Wu, M.-S., 2018, Feasibility of using UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> process to degrade sulfamethazine in aqueous solutions in a large photoreactor, *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 367, 446.
- [57] Chen, L., Cai, T., Cheng, C., Xiong, Z., Ding, D., 2018, Degradation of acetamidiprid in UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and UV/persulfate systems: A comparative study, *Chemical Engineering Journal*, 351, 1137.
- [58] Shokri, R., Jalilzadeh Yengejeh, R., Babaei, A.A., Derikvand, E., Almasi, A., 2020, UV activation of hydrogen peroxide for removal of azithromycin antibiotic from treatment of antiepileptic drug carbamazepine, *Chemosphere*, 54, 497.
- [41] Ocampo-Pérez, R., Sánchez-Polo, M., Rivera-Utrilla, J., Leyva-Ramos, R., 2010, Degradation of antineoplastic cytarabine in aqueous phase by advanced oxidation processes based on ultraviolet radiation, *Chemical Engineering Journal*, 165, 581.
- [42] Jung, Y.J., Kim, W.G., Yoon, Y., Kang, J.-W., Hong, Y.M., Kim, H.W., 2012, Removal of amoxicillin by UV and UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> processes, *Science of the Total Environment*, 420, 160.
- [43] Dai, C.-M., Zhou, X.-F., Zhang, Y.-L., Duan, Y.-P., Qiang, Z.-M., Zhang, T.C., 2012, Comparative study of the degradation of carbamazepine in water by advanced oxidation processes, *Environmental Technology*, 33, 1101.
- [44] Deng, J., Shao, Y., Gao, N., Xia, S., Tan, C., Zhou, S., Hu, X., 2013, Degradation of the antiepileptic drug carbamazepine upon different UV-based advanced oxidation processes in water, *Chemical Engineering Journal*, 222, 150.
- [45] Rocha, O.R.S., Pinheiro, R.B., Duarte, M.M.M.B., Dantas, R.F., Ferreira, A.P., Benachour, M., Da Silva, V.L., 2013, Degradation of the antibiotic chloramphenicol using photolysis and advanced oxidation process with UVC and solar radiation, *Desalination and Water Treatment*, 51, 7269.
- [46] Zorro, A., Fidaleo, M., Fidaleo, M., Lavecchia, R., 2014, Degradation and antibiotic activity reduction of chloramphenicol in aqueous solution by UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> process, *Journal of Environmental Management*, 133, 302.
- [47] Borowska, E., Felis, E., Miksch, K., 2015, Degradation of sulfamethoxazole using UV and UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> processes, *Journal of Advanced Oxidation Technologies*, 18, 69.
- [48] De Souza Santos, L.V., Meireles, A.M., Lange, L.C., 2015, Degradation of antibiotics norfloxacin by Fenton, UV and UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, *Journal of Environmental Management*, 154, 8.
- [49] Dogan, S., Kidak, R., 2016, A plug flow reactor model for UV-based oxidation of amoxicillin, *Desalination and Water Treatment*, 57, 13586.

- and UV-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>: Reaction kinetics and effects of interfering substances, *Emerging Contaminants*, 5, 53.
- [67] Angeli, S., Adams, E., Masceno, G.P., Lima, R.M., Utzig, L.M., Rodrigues-Silva, F., Prola, L.D.T., Freitas, A.M., Liz, M.V., 2021, Toxicity assays of commercial Chlorpyrifos under UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and UVC photolysis treatments, *Water, Air, & Soil Pollution*, 232, 353.
- aqueous solution: determination of optimum conditions by response surface methodology, *Toxin Reviews*, 39, 284.
- [59] Khorsandi, H., Teymori, M., Aghapour, A.A., Jafari, S.J., Taghipour, S., Bargeshadi, R., 2019, Photodegradation of ceftriaxone in aqueous solution by using UVC and UVC/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> oxidation processes, *Applied Water Science*, 9, 81.
- [60] Sierra, R.S.C., Zúñiga-Benítez, H., Peñuela, G.A., 2020, Experimental data on antibiotic cephalixin removal using hydrogen peroxide and simulated sunlight radiation at lab scale: Effects of pH and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, *Data in Brief*, 30, 105437.
- [61] Liu, X., Liu, Y., Lu, S., Wang, Z., Wang, Y., Zhang, G., Guo, X., Guo, W., Zhang, T., Xi, B., 2020, Degradation difference of ofloxacin and levofloxacin by UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and UV/PS (persulfate): Efficiency, factors and mechanism, *Chemical Engineering Journal*, 385, 123987.
- [62] Dong, W., Yang, C., Zhang, L., Su, Q., Zou, X., Xu, W., Gao, X., Xie, K., Wang, W., 2021, Highly efficient UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> technology for the removal of nifedipine antibiotics: Kinetics, co-existing anions and degradation pathways, *Chemical Engineering Journal*, 16, e0258483.
- [63] Daneshvar, N., Zorriyeh Asghar, Y., Behnajady, M.A., 2007, Photooxidative degradation of 4-nitrophenol (4-NP) in UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> process: Influence of operational parameters and reaction mechanism, *Journal of Hazardous Materials*, 139, 275.
- [64] Lee, Y.-M., Lee, G., Zoh, K.-D., 2021, Benzophenone-3 degradation via UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and UV/persulfate reactions, *Journal of Hazardous Materials*, 403, 123591.
- [65] Lopez-Alvarez, B., Villegas-Guzman, P., Peñuela, G.A., Torres-Palma, R.A., 2016, Degradation of a toxic mixture of the pesticides carbofuran and iprodione by UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>: Evaluation of parameters and implications of the degradation pathways on the synergistic effects, *Water, Air, & Soil Pollution*, 227, 215.
- [66] Adak, A., Das, I., Mondal, B., Koner, S., Datta, P., Blaney, L., 2019, Degradation of 2,4-dichlorophenoxyacetic acid by UV 253.7

“Review article”

## A review of new methods of removing environmental pollutants: Photolysis and UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> processes

Removal of pollutants by photolysis and UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> processes

Hamed Eskandarloo\*

Department of Chemistry, University of La Verne, Los Angeles, California, USA

\*Corresponding author: heskandarloo@laverne.edu

(Received: 13 August 2023, Accepted: 9 October 2023)

### Abstract

Organic contaminants, such as dye pollutants, pharmaceutical compounds, pesticides, etc. are increasingly found in water sources, and therefore need to be controlled by modern water treatment technologies. Advanced oxidation processes are often used as an effective method to remove organic contaminants. UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> process has shown acceptable results for removing a wide range of mentioned pollutants. In this paper, the efficiency of photolysis and UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> processes in removing organic contaminants were reviewed, and then, the significant results obtained were reported.

**Conflict of interest:** None declared.

**Keywords:** Photolysis, UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, Dye pollutants, Pharmaceutical pollutants



دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز  
فصلنامه آلودگی‌های محیطی و توسعه پایدار شهری

دوره اول، شماره ۱، پیاپی ۱  
بهار ۱۴۰۳، صفحات ۳۱-۲۱

## "مقاله مروری"

# حلال‌های یوتکتیک عمیق: حلال‌های سبز نوظهور

## حلال‌های یوتکتیک عمیق سبز

### بهرام به‌نژادی\*

استادیار دانشکده مهندسی مواد، مرکز تحقیقات مواد پیشرفته، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

\*نویسنده مسئول مکاتبات: b\_behnajady@sut.ac.ir

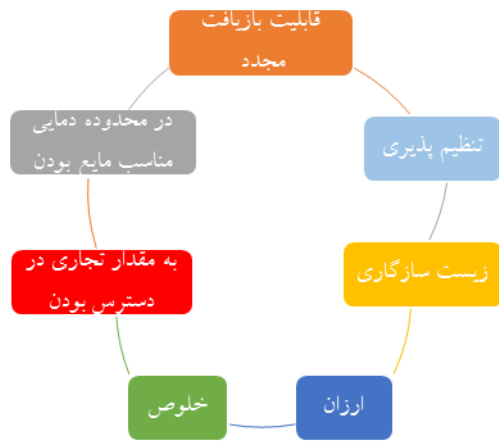
(دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۵/۱۵، پذیرش نهایی: ۱۴۰۲/۰۷/۰۳)

## چکیده

توسعه پایدار و به تبع آن صنعت سبز نیازمند استفاده از حلال‌های جدیدی به جای حلال‌های متداول است. حلال‌های متداول اغلب سمی و فرار هستند و باعث مشکلات زیست محیطی می‌شوند. در چند دهه اخیر حلال‌های یوتکتیک عمیق توسط محققین در سرتاسر دنیا مورد توجه قرار گرفته‌اند. در این مقاله، پیشینه ظهور و استفاده از حلال‌های یوتکتیک عمیق از طریق اسناد منتشر شده در این زمینه مورد بررسی قرار گرفته است. حلال‌های یوتکتیک عمیق ترکیبی از دو یا سه جزء ارزان و ایمن هستند که از طریق پیوند هیدروژنی ترکیب می‌شوند. بطوریکه یک محلول یوتکتیک با دمای ذوب پایین‌تر از هر کدام از اجزای ترکیبات تشکیل دهنده بدست می‌آید و حلال بدست آمده عموماً در دماهای کم‌تر از  $100^{\circ}\text{C}$  به حالت مایع است. حلال‌های یوتکتیک عمیق رفتار و خواص فیزیکی و شیمیایی مشابهی با محلول‌های یونی از خود نشان می‌دهند. در حالی که حلال‌های یوتکتیک عمیق خیلی ارزان‌تر و زیست‌سازگارتر از محلول‌های یونی هستند. به دلیل مزیت‌های زیاد حلال‌های یوتکتیک عمیق مطالعات بسیار زیادی در زمینه تهیه و سنتز حلال‌ها و همچنین بررسی و شناخت خواص فیزیکی و شیمیایی آن‌ها انجام می‌گیرد. علاوه بر این کاربرد حلال‌های یوتکتیک عمیق در زمینه‌های مختلف در حال بررسی بوده و استفاده از این حلال‌ها در زمینه‌هایی نظیر سنتز نانوذرات، الکتروپولیش، پوشش‌دهی الکتریکی، استخراج فلزات به سرعت در حال افزایش است. به طور کلی، حلال‌های یوتکتیک عمیق به دلیل خواص مثبت آن‌ها در مقایسه با حلال‌های معمولی، پتانسیل قابل توجهی برای توسعه پایدار و کاربردهای صنعت سبز از خود نشان می‌دهند. تحقیقات در حال انجام به منظور افزایش درک ما از این حلال‌ها و کشف کاربردهای متنوع آن‌ها در زمینه‌های مختلف ادامه دارد.

**واژه‌های کلیدی:** حلال، یوتکتیک عمیق، حلال سبز، توسعه پایدار

## مقدمه



شکل (۱): ویژگی‌های مایعات به عنوان حلال

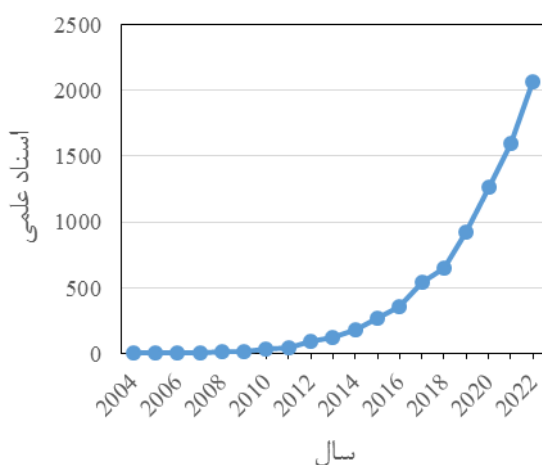
بسیاری از فرآیندهای صنعتی از قبیل فرآیندهای مورد استفاده در صنایع نساجی، کاغذ، غذایی، فلزات و شیمیایی و همچنین آزمایشگاهی مثل سنتز، تصفیه و آنالیز نیازمند استفاده از حلال مناسب هستند. بنابراین بایستی حلال‌هایی وجود داشته باشند که خواص مطلوب و مورد نظر فرآیند را تامین کرده و از طرف دیگر معایب و اثرات نامطلوب روی محیط اطراف نداشته و یا اثرات نامطلوب حداقلی داشته باشد (۱ و ۲).

در شکل ۱ ویژگی‌هایی که مایعات بایستی داشته باشند تا به عنوان حلال استفاده شوند، آورده شده است. یک حلال بایستی در محدوده مناسبی از دما مثل دمای محیط به شکل مایع باشد. این مایع بایستی به مقدار تجاری در دسترس باشد و خلوص مناسبی برای فرآیند مورد نظر داشته باشد و یا به آسانی برای استفاده در فرآیند مورد نظر قابل تصفیه باشد. همچنین بایستی نسبت به فرآیند مورد نظر، گران قیمت نبوده و عموماً قابلیت بازیافت مجدد را داشته باشد. علاوه بر این‌ها بایستی زیست سازگار بوده و در زمان ذخیره‌سازی نبایستی مشکلات زیست محیطی داشته باشد. یکی دیگر از جنبه‌های مهم حلال‌ها، قابلیت تنظیم‌پذیری<sup>۱</sup> آن‌ها است. بطوریکه انحلال ترکیب مطلوب و یا حتی غیرمطلوب از طریق تغییر شرایطی مثل دما، فشار یا از طریق استفاده از افزودنی امکان‌پذیر باشد (۳).

آب بخاطر مزایای فراوان و اثرات نامطلوب حداقلی، حلالی است که به طور گسترده استفاده می‌شود. به آسانی با خلوص مطلوب در دسترس بوده و ارزان است. همچنین در محدوده دمایی مناسبی به شکل مایع بوده و قابلیت بازگردانی دارد. علاوه بر این برای بیش‌تر حل‌شونده‌ها، حلالیت مناسبی دارد، غیرسمی بوده و سازگار با محیط زیست می‌باشد. حتی می‌توان از آب در دماها و فشارهای بالاتر از نقطه جوش و شرایط بحرانی نیز استفاده کرد (۴ و ۳). با این وجود، برای مواد غیرقطبی، بیش‌تر گازهای دائمی<sup>۲</sup>، پلیمرهای صنعتی و مواد جامدی که انرژی ساختاری بالایی دارند و نمی‌توان توسط انرژی آبپوشی و تغییر آنتروپی حین انحلال بر آن غلبه نمود، آب به عنوان یک حلال ضعیف عمل می‌کند. علاوه بر این بعضی مواقع نیاز است که برخی ترکیبات بدون تغییر باقی بمانند، ولی آب نسبت به این ترکیبات موثر بوده و منجر به انحلال آن‌ها می‌شود. بنابراین یافتن حلال‌های جایگزین و مناسب که بتوان در صنعت و کارهای آزمایشگاهی به طور

<sup>2</sup> Permanent gases<sup>1</sup> Tunability

در شکل ۴ توزیع نوع اسناد علمی منتشره در مورد حلال‌های یوتکتیک عمیق آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود ۸۷/۱ درصد از اسناد منتشره به صورت مقاله می‌باشد که نسبت به انواع دیگر اسناد سهم نسبتاً بزرگی را به خود اختصاص داده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که حلال‌های یوتکتیک عمیق جزء حلال‌های نوظهور بوده و جای مطالعه و پژوهش بسیاری در این زمینه وجود دارد. نکته قابل توجه دیگر در مورد حلال‌های یوتکتیک عمیق توزیع جهانی انتشارات و کارهای پژوهشی انجام گرفته است. همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود چین با اختلاف چشمگیری بیش‌ترین تعداد اسناد علمی منتشره را به خود اختصاص داده است. در رتبه‌های بعدی کشورهای نظیر ایران، هند و ایالات متحده با اختلاف بسیار اندک از یکدیگر قرار دارند.



شکل (۲): تعداد اسناد علمی منتشره در زمینه حلال‌های یوتکتیک عمیق براساس سال (۸)

گسترده مورد استفاده قرار گیرد، ضروری می‌باشد (۷-۵ و ۳).

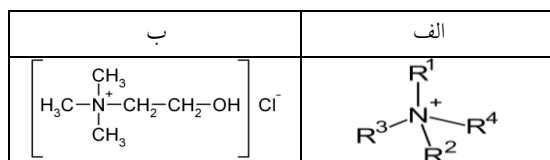
### اسناد علمی منتشره در زمینه حلال‌های یوتکتیک عمیق<sup>۳</sup>

با توجه به ویژگی‌ها و خواص مناسب، حلال‌های یوتکتیک عمیق مورد توجه پژوهشگران زیادی قرار گرفته و مطالعات نسبتاً زیادی در زمینه شناخت و کاربرد این حلال‌ها انجام گرفته است. بنابراین پژوهشگران ابتدا به سنتز حلال‌های یوتکتیک عمیق پرداخته و در ادامه خواص فیزیکی و شیمیایی آن‌ها را مورد بررسی و شناخت قرار داده‌اند. همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، مطالعات و پژوهش‌های انجام گرفته در زمینه حلال‌های یوتکتیک عمیق در سال‌های اخیر به سرعت در حال افزایش می‌باشد. بطوریکه تعداد اسناد علمی منتشره به صورت نمایی افزایش یافته است. از طرف دیگر شکل ۳ تعداد اسناد علمی منتشره در مورد حلال‌های یوتکتیک عمیق در زمینه‌های مختلف را نشان می‌دهد که زمینه شیمی، زمینه اصلی بوده و با ۲۸/۸ درصد بیش‌ترین تعداد اسناد علمی منتشره را به خود اختصاص داده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که بیش‌تر مطالعات و پژوهش‌های انجام گرفته در مورد حلال‌های یوتکتیک عمیق در راستای سنتز حلال‌های یوتکتیک عمیق و شناسایی خواص و ویژگی‌های این نوع حلال‌ها بوده است. زمینه‌های مهندسی شیمی و علم مواد عمدتاً در جهت کاربرد و نحوه استفاده از حلال‌های یوتکتیک عمیق در رتبه‌های بعدی قرار گرفته‌اند.

<sup>3</sup> Deep Eutectic Solvents

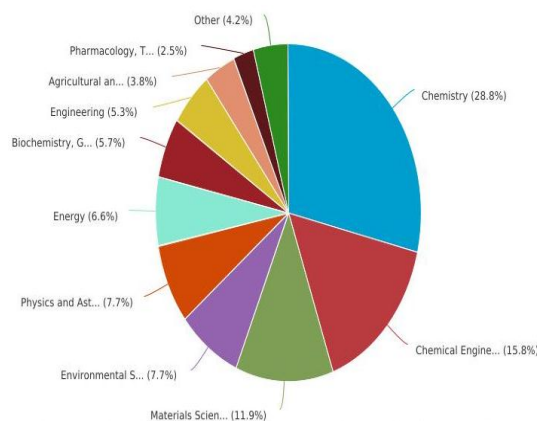
## پیدایش حلال‌های یوتکتیک عمیق

در سال ۲۰۰۱ طی مطالعات ابوت<sup>۴</sup> و همکارانش (۹) نمک‌های آمونیوم نوع چهارم (شکل ۶) با کلرید روی ( $ZnCl_2$ ) حرارت داده شده و دمای انجماد مایعات اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد، کم‌ترین دمای ذوب که حدود ۲۵-۲۳ درجه سلسیوس بود، مربوط به ترکیب کولین کلراید (شکل ۶) می‌باشد. این مطالعات گسترش پیدا کرده و حلال‌های یوتکتیک متعددی تشکیل شدند (۱۸-۱۰).

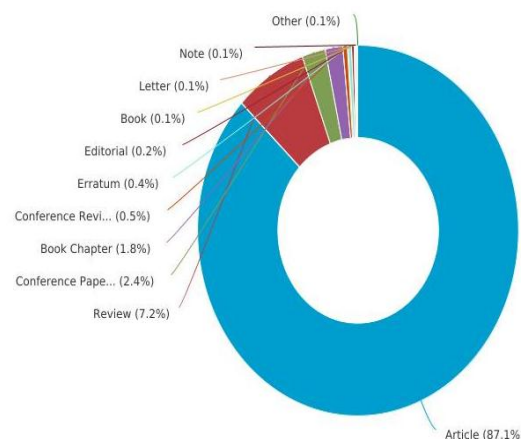


شکل (۶): الف: کاتیون آمونیوم نوع چهارم، ب: کولین کلراید

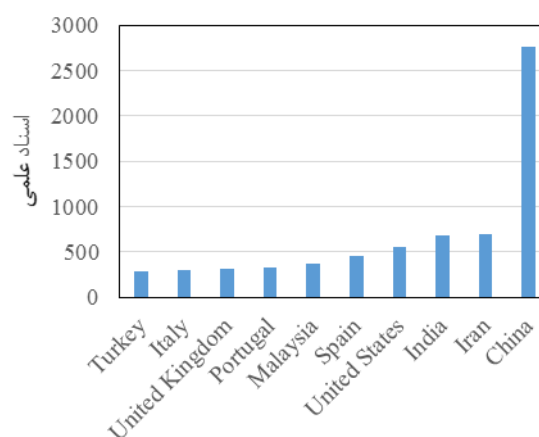
بنابراین حلال‌های یوتکتیک عمیق حاوی یون‌های بزرگ نامتقارن هستند که انرژی شبکه پایین داشته و در نتیجه دمای ذوب کمی دارند. به طور مثال دمای ذوب کولین کلراید و اوره به ترتیب ۳۰۲ و ۱۳۳ درجه سلسیوس می‌باشد که وقتی با نسبت مول یک به دو مخلوط شوند دمای ذوب آن به ۱۲ درجه سلسیوس می‌رسد. بصورت شماتیک نحوه سنتز حلال یوتکتیک عمیق در شکل ۷ نشان داده شده است (۹).



شکل (۳): توزیع اسناد علمی منتشره در مورد حلال‌های یوتکتیک عمیق بر اساس زمینه (۸)



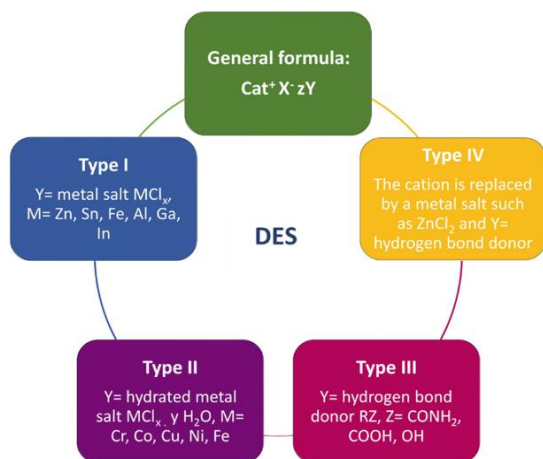
شکل (۴): توزیع اسناد علمی منتشره در مورد حلال‌های یوتکتیک عمیق بر اساس نوع سند (۸)



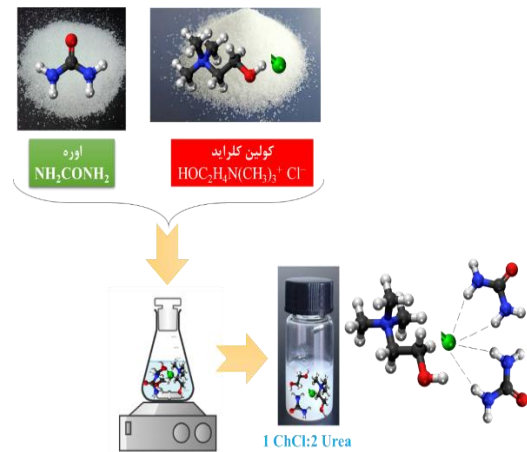
شکل (۵): توزیع جهانی اسناد علمی منتشره در مورد حلال‌های یوتکتیک عمیق (۸)

<sup>4</sup> Abbott





شکل (۸): انواع حلال‌های یوتکتیک عمیق (۹)



شکل (۷): نحوه تشکیل حلال یوتکتیک عمیق از کولین کلراید و اوره

### انواع حلال‌های یوتکتیک عمیق

در شکل ۸ فرمول کلی حلال‌های یوتکتیک عمیق آورده شده است که در آن  $Cat^+$  کاتیون آمونیوم، فسفونیوم یا سولفونیوم بوده و X باز لوئیس می‌باشد که عمدتاً آنیون هالید هست. گونه‌های آنیونی کمپلکس بین  $X^-$  و یک اسید لوئیس یا برونستد Y (Z) نشان دهنده تعداد مولکول‌های Y است که با آنیون واکنش می‌دهد) تشکیل می‌شوند. همانطور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود دسته‌بندی حلال‌های یوتکتیک عمیق براساس عامل کمپلکس انجام گرفته که به ۴ نوع کلی تقسیم شده‌اند. از بین این ترکیبات، یوتکتیک‌های نوع ۳ که از ترکیب نمک آمونیوم نوع چهارم و دهنده پیوند هیدروژنی به دست می‌آیند بیش‌تر مورد توجه بوده و استفاده می‌شوند. چون که این ترکیبات قابلیت انحلال گونه‌های وسیعی از کلریدها و اکسیدهای فلزات واسطه را دارند. در این ترکیبات کولین کلراید به دلیل ارزانی، زیست تخریب‌پذیری و سمیت کم‌تر، به طور گسترده به عنوان نمک آلی (نمک آمونیوم نوع چهارم) در نقش گیرنده پیوند هیدروژنی استفاده می‌شود (۱۸ و ۱۵، ۳).

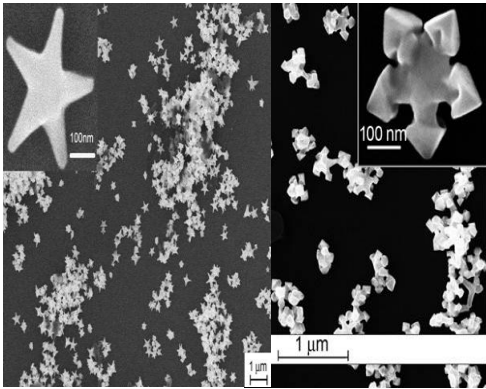
### خواص حلال‌های یوتکتیک عمیق

حلال‌های یوتکتیک عمیق قابلیت تغییر ساختار و نسبت ترکیبات را دارند که جهت دستیابی به خواص مورد نظر مطلوب است. عدم اشتعال از مهم‌ترین ویژگی‌های این ترکیبات بوده و برعکس حلال‌های متداول که عمدتاً ترکیبات آلی فرار هستند، حلال‌های یوتکتیک عمیق فشار بخار و سمیت بسیار کمی دارند. این خواص منجر به ایجاد پتانسیل بالایی برای ترکیبات جهت استفاده در بسیاری از فرآیندها، همچون فرآیند کاتالیز، جدایش و الکتروشیمی ایجاد می‌کنند. همچنین به دلیل ارزان بودن و قابلیت بازیافت، این حلال‌ها جزء حلال‌های سبز ایده‌آل بوده و دوستدار محیط زیست می‌باشند (۱۸ و ۱۶، ۱۴، ۳).

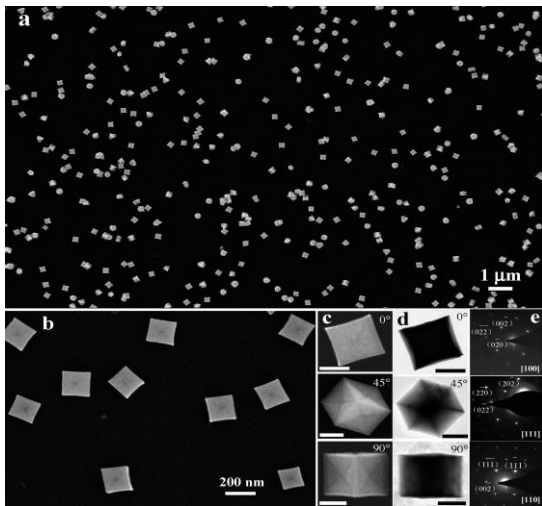
### کاربردهای حلال‌های یوتکتیک عمیق

حلال‌های یوتکتیک عمیق به دلیل خواص و ویژگی‌های مناسبی که دارند در بسیاری از زمینه‌ها به کار برده شده‌اند که در ادامه به برخی از آنها اشاره شده است. بعد از سنتز حلال‌های یوتکتیک

شیمیایی رشد نانوذرات پلاتین (شکل ۱۰) کنترل شدند (۲۰).



شکل (۹): تصاویر SEM نانوذرات طلا با اشکال مختلف (۱۹)



شکل (۱۰): تصاویر SEM و TEM نانوذرات پلاتین (۲۰)

از دیگر کاربردهای حلال‌های یوتکتیک عمیق به الکتروپولیش توسط این حلال‌ها اشاره کرد که سه مزیت اساسی نسبت به محلول‌های آبی دارد (۲۱ و ۲۲):

۱) تصاعد گاز در فصل مشترک محلول و آند ناچیز است (احتمال واکنش جانبی خیلی کم است).

۲) راندمان جریان بیشتری دارد.

۳) حلال‌های مورد استفاده کم خطر و غیرخورنده

هستند.

عمیق یکی از زمینه‌های پژوهشی مهم بررسی انحلال عناصر مختلف در این حلال‌ها می‌باشد. در ادامه سعی شد در زمینه سنتز و تولید مواد و ترکیبات مختلف با خواص و ویژگی‌های خاص از این حلال‌ها استفاده شود که نتایج بسیار جالبی نیز بدست آمده است. یکی از کاربردهای جالب و جذاب حلال‌های یوتکتیک عمیق در سنتز نانوذرات فلزی است که شکل کنترل شده‌ای دارند. این نانوذرات با شکل مشخص تاثیر شگرفی بر علم الکتروکاتالیز دارند. لیاو<sup>۵</sup> و همکارانش (۱۹) در حلال‌های یوتکتیک عمیق حتی بدون استفاده از جوانه‌زا یا سورفکتانت نانوذرات طلا را جهت استفاده به عنوان کاتالیست پایه طلا سنتز کردند. نانوذرات ستاره شکل طلا که در شکل ۹ مشاهده می‌شوند، از طریق احیاء  $\text{HAuCl}_4$  توسط  $\text{L-Ascorbic Acid}$  در دمای اتاق از حلال صورت گرفته است. نانوذرات با اشکال و ساختار مختلف تنها با تغییر آب محتوای حلال یوتکتیک عمیق امکان‌پذیر بوده است. خواص الکتروکاتالیستی<sup>۶</sup> اشکال مختلف نانوذرات طلا با استفاده از احیای الکتریکی<sup>۷</sup> آب اکسیژنه بررسی شده است. نتایج نشان داده نانوذرات ستاره شکل نسبت به دیگر شکل‌ها خواص کاتالیستی خیلی بالاتری دارد. حتی سنتز نانوذرات پلاتین با شکل کنترل شده و انرژی سطح بالا از طریق حلال یوتکتیک عمیق انجام گرفته است. بطوریکه به راحتی و بدون نیاز به جوانه‌زا، سورفکتانت یا دیگر مواد

<sup>5</sup> Liao

<sup>6</sup>Electrocatalytic

<sup>7</sup>Electroreduction

هیدروکسیدهای غیرمحلول روی سطح الکتروود، مانع از پوشش فلز مورد نظر می‌شود. بنابراین وقتی لایه ضخیم از فلز نیاز باشد، این محدودیت مشکل‌ساز خواهد بود. ایجاد لایه‌های ضخیم‌تر فلز، بدون نیاز به عوامل کمپلکس‌کننده، توسط حلال‌های یوتکتیک عمیق به دلیل عدم پسیوشدن پوشش (حلالیت بالای هیدروکسید و اکسید فلزات) امکان‌پذیر است.

پوپسکو<sup>۸</sup> و همکارانش (۲۷) پوشش‌دهی الکتریکی مس از حلال یوتکتیک عمیق حاوی کلرید مس (II) را مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه از ترکیبات مختلف کولین کلراید با دهنده پیوند هیدروژنی مثل اوره، مالونیک اسید، اگزالیک اسید و اتیلن گلیکول استفاده گردید. بهترین پوشش همگن و چسبنده از حلال‌های کولین کلراید-اگزالیک اسید و کولین کلراید - اتیلن گلیکول به دست آمد. علاوه بر این پوشش‌دهی الکتریکی نیکل از نیکل کلراید دوآبه حل شده در کولین کلراید - اتیلن گلیکول و کولین کلراید - اوره مورد بررسی قرار گرفت (۲۸). نتایج نشان داد که سیستیک و ترمودینامیک فرآیند کاملاً متفاوت از فرآیند محلول‌های آبی است و منجر به مورفولوژی‌های متفاوت نسبت به محلول‌های آبی می‌شود.

همانطور که اشاره شد، حلال‌های یوتکتیک عمیق حلالیت بالایی برای نمک‌های فلزات دارند. این ویژگی باعث گسترش استفاده از این حلال‌ها در استخراج فلزات شده است. در حین فرآیند تولید آهن در کوره‌های قوس الکتریکی<sup>۹</sup>، بدلیل استفاده از

در شکل ۱۱ فولاد زنگ‌نزن قبل و بعد الکتروپولیش نشان داده شده است. علاوه بر فولاد زنگ‌نزن، الکتروپولیش آلومینیوم، تیتانیم، آلیاژهای کبالت، نیکل و سوپر آلیاژها نیز مورد بررسی قرار گرفته است (۲۶-۲۳).

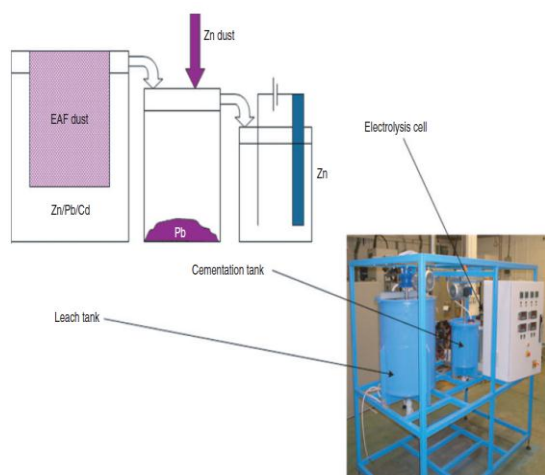


شکل (۱۱): فولاد زنگ‌نزن سمت راست قبل و سمت چپ بعد از الکتروپولیش (۱۸)

محلول‌های ایده‌آل مورد استفاده در پوشش‌دهی الکتریکی بایستی ارزان، اشتعال ناپذیر، حلالیت بالا نسبت به نمک‌های فلزات، رسانایی بالا، نرخ انتقال جرم بالا و همچنین پایداری الکتروشیمیایی بالایی داشته باشند. اما مهم‌ترین محدودیت سیستم‌های پایه آبی پایداری الکتروشیمیایی و تصاعد گاز به دلیل محدود بودن پنجره پتانسیل است. این محدودیت منجر به تصاعد گاز و در نتیجه تردشوندگی هیدروژنی و پسیوشدن زیر لایه، الکتروود و پوشش می‌شود. حلال‌های یوتکتیک عمیق حلالیت بالایی برای نمک‌های فلزات همچنین اکسیدها و هیدروکسیدهای آن‌ها دارند. این یکی از مهم‌ترین مزیت‌های حلال‌های یوتکتیک عمیق نسبت به حلال‌های آلی و آبی است. در محلول‌های آبی عموماً پسیوشدن در اثر تشکیل و رسوب اکسیدها یا

<sup>8</sup> Popescu

<sup>9</sup> Electric Arc Furnace



شکل (۱۲): تصویر فرآیند نیمه صنعتی استفاده شده جهت تولید روی از گرد و غبار توسط حلال یوتکتیک عمیق (۳۳)

### نتیجه‌گیری

با توجه به محدودیت‌های موجود در مورد حلال‌های متداول و مشکلات زیست محیطی آن‌ها، تهیه و استفاده از حلال‌های جدیدی مثل حلال‌های یوتکتیک عمیق ضروری به نظر می‌آید. در چند دهه اخیر حلال‌های یوتکتیک عمیق بخصوص در زمینه‌های الکتروشیمی، شیمی مواد و اخیراً در عملیات مواد بیومس بسیار مورد توجه بودند. مطالعات در زمینه سنتز این حلال‌ها از طریق مخلوط کردن ترکیبات مختلف که یکی در نقش دهنده پیوند هیدروژنی و دیگری به عنوان گیرنده پیوند هیدروژنی بوده، منجر به شناخت ۴ نوع حلال یوتکتیک عمیق شده است. در همه این حلال‌ها، هر دو ترکیب دهنده و گیرنده پیوند هیدروژنی دمای ذوب بسیار بالایی دارند. اما مخلوط مناسبی که از آن‌ها منجر به تشکیل یک فاز مایع می‌شود با دمای انجماد بسیار پایین (اغلب کم‌تر از دمای محیط) که حلال یوتکتیک عمیق نامیده می‌شود. یوتکتیک‌های نوع ۳ بدلیل داشتن قابلیت انحلال ترکیبات کلریدی

قراضه‌های فولادی گرد و غباری<sup>۱۰</sup> تولید شده که حاوی روی، آهن و فلزات سمی بصورت اکسید مانند کادمیوم و سرب است. این گرد و غبار بدلیل حضور مقادیر بالای روی، منبع مناسبی برای تولید این فلز بوده و از طرف دیگر به دلیل حضور فلزات سمی، ذخیره‌سازی و نگهداری از آن‌ها نیز مشکل است. بنابراین محققین زیادی سعی در تولید روی از این منبع ثانویه کردند (۲۹-۳۲). اخیراً از حلال‌های یوتکتیک عمیق جهت لیچینگ گرد و غبار فولادسازی استفاده شده است. در این بررسی‌ها از کولین کلراید به‌عنوان گیرنده پیوند هیدروژنی و همچنین اوره و اتیلن گلیکول به‌عنوان اهداکننده پیوند هیدروژنی استفاده شده است. ترکیب کولین کلراید-اوره علاوه بر حلالیت نسبتاً بالا برای روی خاصیت انحلال انتخابی نسبت به آهن را نیز دارا می‌باشد. بنابراین این حلال به صورت انتخابی و با حداقل انحلال آهن، توانسته روی را با بازده نسبتاً مناسب حل کند. با این وجود حلال یوتکتیک عمیق کولین کلراید - اوره ویسکوزیته بالایی دارد و کار کردن با آن سخت است. جهت رفع این مشکل و همچنین بهبود بازده انحلال روی از ترکیب ۳ تایی کولین کلراید - اوره - اتیلن گلیکول استفاده شده که منجر به بهبود نتایج شده است. همانطور که در شکل ۱۲ نشان داده شده است، این فرآیند در مقیاس نیمه صنعتی انجام گرفته و از طریق الکترووینینگ<sup>۱۱</sup> محلول حاصل از انحلال روی فلزی تولید شده است.

<sup>10</sup> Dust

<sup>11</sup> Electrowinning

frameworks, Coordination Chemistry Reviews, 426, 213544.

[3] Reichardt, C., 2007, Solvents and solvent effects: An introduction. Organic Process Research & Development, 11, 105.

[4] Messerle, B.A., Wider, G., Otting, G., Weber, C., Wuthrich, K., 1989, Solvent suppression using a spin lock in 2D and 3D NMR spectroscopy with H<sub>2</sub>O solutions, Journal of Magnetic Resonance, 85, 608.

[5] Del Valle, E.M.M., 2004, Cyclodextrins and their uses: a review, Process Biochemistry, 39, 1033.

[6] Yu, D., Xue, Z., Mu, T., 2022, Deep eutectic solvents as a green toolbox for synthesis, Cell Reports Physical Science. 3, 100809.

[7] Reichardt, C., Welton, T., 2011, Solvents and solvent effects in organic chemistry, Fourth Edition, John Wiley & Sons, pp. 1-7.

[8] Scopus Database. Available at: <https://www.scopus.com>.

[9] Abbott, A.P., Capper, G., Davies, D.L., Munro, H.L., Rasheed, R.K., Tambyrajah, V., 2001, Preparation of novel, moisture-stable, Lewis-acidic ionic liquids containing quaternary ammonium salts with functional side chains, Chemical Communications, 19, 2010.

[10] Perna, F.M., Vitale, P., Capriati, V., 2020, Deep eutectic solvents and their applications as green solvents, Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry, 21, 27.

[11] Tang, B., Row, K.H., 2013, Recent developments in deep eutectic solvents in chemical sciences, Monatshefte für Chemie-Chemical Monthly, 144, 1427.

[12] Dai, Y., van Spronsen, J., Witkamp, G-J., Verpoorte, R., Choi, Y.H., 2013, Natural deep eutectic solvents as new potential media for green technology, Analytica Chimica Acta, 766, 61.

[13] Tomé, L.I.N., Baião, V., da Silva, W., Brett, C.M.A., 2018, Deep eutectic solvents for the production and application of new materials, Applied Materials Today, 10, 30.

[14] Liu, Y., Friesen, J.B., McAlpine, J.B., Lankin, D.C., Chen, S.-N., Pauli, G.F., 2018, Natural deep eutectic solvents: properties, applications, and perspectives, Journal of Natural Products, 81, 679.

و اکسیدی، بیش‌تر مورد توجه بوده و بخاطر ارزانی، زیست تخریب‌پذیری و سمیت کم‌تر بیش‌تر از کولین کلراید به عنوان گیرنده پیوند هیدروژنی استفاده می‌شوند. بررسی اسناد علمی منتشره در این زمینه بیانگر نوظهور بودن حلال‌های یوتکتیک عمیق می‌باشد. بطوریکه بیش‌تر مطالعات در زمینه شیمی و در جهت سنتز و شناسایی حلال‌های یوتکتیک عمیق است. چرا که پیشرفت و آینده کاربرد و استفاده از حلال‌های یوتکتیک عمیق وابسته به شناسایی اصولی و پایه‌ای خواص فیزیکی و شیمیایی این حلال‌ها هست. بطوریکه با شناخت ترمودینامیکی این سیستم‌ها و فهم رفتار فازی ترکیبات و همچنین اثرات متقابل آن‌ها، می‌توان خواص و ویژگی‌های حلال‌های یوتکتیک عمیق را پیش‌بینی کرده و در کاربردهای مشخص از آن‌ها بهره برد. همین شناخت‌ها منجر به استفاده از حلال‌های یوتکتیک عمیق در زمینه‌های استخراج فلزات، الکتروشیمی و شیمی مواد شده است.

### تعارض منافع

نویسنده هیچ‌گونه تعارض منافی برای اعلام ندارد.

### منابع

- [1] Kumar, J.A., Krithiga, T., Manigandan, S., Sathish, S., Renita, A.A., Prakash, P., Prasad, B.S.N., Kumar, T.R.P., Rajasimman, M., Hosseini-Bandegharai, A., Prabu, D., Crispin, S., 2021, A focus to green synthesis of metal/metal based oxide nanoparticles: Various mechanisms and applications towards ecological approach, Journal of Cleaner Production, 324, 129198.
- [2] Ryu, U., Jee, S., Rao, P.C., Shin, J., Ko, C., Yoon, M., Park, K.S., Choi, K.M., 2021, Recent advances in process engineering and upcoming applications of metal-organic

- of stainless steels in a choline chloride based ionic liquid: an electrochemical study with surface characterisation using SEM and atomic force microscopy, *Physical Chemistry Chemical Physics*, 8, 4214.
- [26] Smith, E.L., 2013, Deep eutectic solvents (DESS) and the metal finishing industry: where are they now?, *Transactions of the IMF*, 91, 241.
- [27] Popescu, A.-M.J., Constantin, V., Olteanu, M., Demidenko, O., Yanushkevich, K., 2011, Obtaining and structural characterization of the electrodeposited metallic copper from ionic liquids, *Revista de Chimie*, 62, 626.
- [28] Abbott, A.P., El Ttaib, K., Ryder, K.S., Smith, E.L., 2008, Electrodeposition of nickel using eutectic based ionic liquids, *Transactions of the IMF*, 86, 234.
- [29] Dutra, A.J.B., Paiva, P.R.P., Tavares, L.M., 2006, Alkaline leaching of zinc from electric arc furnace steel dust, *Minerals Engineering*, 19, 478.
- [30] Oustadakis, P., Tsakiridis, P.E., Katsiapi, A., Agatzini-Leonardou, S., 2010, Hydrometallurgical process for zinc recovery from electric arc furnace dust (EAFD): Part I: Characterization and leaching by diluted sulphuric acid, *Journal of Hazardous Materials*, 179, 1.
- [31] Youcai, Z., Stanforth, R., 2000, Integrated hydrometallurgical process for production of zinc from electric arc furnace dust in alkaline medium, *Journal of Hazardous Materials*, 80, 223.
- [32] Li, H., Wang, Y., Cang, D., 2010, Zinc leaching from electric arc furnace dust in alkaline medium, *Journal of Central South University of Technology*, 17, 967.
- [33] Abbott, A.P., Collins, J., Dalrymple, I., Harris, R.C., Mistry, R., Qiu, F., Scheirer, J., Wise, W.R., 2009, Processing of electric arc furnace dust using deep eutectic solvents, *Australian Journal of Chemistry*, 62, 341.
- [15] Paiva, A., Craveiro, R., Aroso, I., Martins, M., Reis, R.L., Duarte, A.R.C., 2014, Natural deep eutectic solvents – Solvents for the 21st century, *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2, 1063.
- [16] El Achkar, T., Greige-Gerges, H., Fourmentin, S., 2021, Basics and properties of deep eutectic solvents: a review, *Environmental chemistry letters*, 19, 3397.
- [17] Hansen, B.B., Spittle, S., Chen, B., Poe, D., Zhang, Y., Klein, J.M., Horton, A., Adhikari, L., Zelovich, T., Doherty, B.W., 2020, Deep eutectic solvents: A review of fundamentals and applications, *Chemical Reviews*, 121, 1232.
- [18] Smith, E.L., Abbott, A.P., Ryder, K.S., 2014, Deep eutectic solvents (DESS) and their applications, *Chemical Reviews*, 114, 11060.
- [19] Liao, H.G., Jiang, Y.X., Zhou, Z.Y., Chen, S.P., Sun, S.G., 2008, Shape-controlled synthesis of gold nanoparticles in deep eutectic solvents for studies of structure-functionality relationships in electrocatalysis, *Angewandte Chemie International Edition*, 47, 9100.
- [20] Wei, L., Fan, Y.-J., Tian, N., Zhou, Z.-Y., Zhao, X.-Q., Mao, B.-W., Sun, S.-G., 2012, Electrochemically shape-controlled synthesis in deep eutectic solvents: A new route to prepare Pt nanocrystals enclosed by high-index facets with high catalytic activity, *The Journal of Physical Chemistry C*, 116, 2040.
- [21] Mohan, S., Kanagaraj, D., Sindhuja, R., Vijayalakshmi, S., Renganathan, N.G., 2001, Electropolishing of stainless steel-a review, *Transactions of the IMF*, 79, 140.
- [22] Abbott, A.P., Capper, G., McKenzie, K.J., Ryder, K.S., 2006, Voltammetric and impedance studies of the electropolishing of type 316 stainless steel in a choline chloride based ionic liquid, *Electrochimica Acta*, 51, 4420.
- [23] Karim, W.O., Abbott, A.P., Cihangir, S., Ryder, K.S., 2018, Electropolishing of nickel and cobalt in deep eutectic solvents, *Transactions of the IMF*, 96, 200.
- [24] Abbott, A.P., Dsouza, N., Withey, P., Ryder, K.S., 2012, Electrolytic processing of superalloy aerospace castings using choline chloride-based ionic liquids, *Transactions of the IMF*, 90, 9.
- [25] Abbott, A.P., Capper, G., McKenzie, K.J., Glidle, A., Ryder, K.S., 2006, Electropolishing

“Review article”

## Deep eutectic solvents: Emerging green solvents Green deep eutectic solvents

Bahram Behnajady\*

Materials Engineering Faculty, Advanced Material Research Centre, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

\*Corresponding author: b\_behnajady@sut.ac.ir

(Received: 6 August 2023, Accepted: 25 September 2023)

### Abstract

Sustainable development and the growth of green industries require the adoption of new solvents to replace traditional ones. Conventional solvents are known to be toxic and volatile and pose significant environmental challenges. In recent years, scientists around the world have extensively investigated deep eutectic solvents. This article aims to provide an overview of the history and use of deep eutectic solvents based on published literature in this field. Deep eutectic solvents consist of two or three inexpensive and safe components that are combined to form a eutectic solution with a lower melting temperature than each individual component. Consequently, these solvents typically remain liquid at temperatures below 100°C. Deep eutectic solvents exhibit similar behavior and physicochemical properties to ionic solutions but are more cost-effective and biocompatible. Due to their numerous advantages, extensive studies have been conducted on their preparation, synthesis, as well as their physical and chemical properties. Furthermore, deep eutectic solvents are being investigated for various applications, and their use in fields, such as nanoparticle synthesis, electropolishing, electrodeposition, and metal extraction, is rapidly increasing. Overall, the adoption of deep eutectic solvents offers significant potential for sustainable development and green industry applications due to their favorable properties compared to conventional solvents. Ongoing research continues to expand our understanding of these solvents and explore their diverse applications in various fields.

**Conflict of interest:** None declared.

**Keywords:** Solvent, Deep eutectic, Green solvent, Sustainable development







دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز  
فصلنامه آلودگی‌های محیطی و توسعه پایدار شهری

دوره اول، شماره ۱، پیاپی ۱  
بهار ۱۴۰۳، صفحات ۴۱-۳۳

## "مقاله پژوهشی"

# حذف پارانیتروفنل از محیط‌های آبی توسط فرایند $UV/S_2O_8^{2-}$ در یک فتوراکتور پیوسته: بهینه‌سازی به روش طراحی آزمایش‌ها

حذف پارانیتروفنل توسط فرایند  $UV/S_2O_8^{2-}$  در یک فتوراکتور پیوسته

سیدحامد ظفری غازانی\*

دانش آموخته دکتری شیمی کاربردی، دانشکده شیمی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

\*نویسنده مسئول مکاتبات: seyyed.hamed.zafari@gmail.com

(دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۷/۳۰، پذیرش نهایی: ۱۴۰۲/۰۹/۱۲)

## چکیده

در این کار تحقیقی حذف یک آلاینده آلی تحت عنوان پارانیتروفنل (PNP) با استفاده از فرایند  $UV/S_2O_8^{2-}$  در یک فتوراکتور پیوسته آنولار مورد بررسی قرار گرفته و شرایط عملیاتی موثر در کارایی فرایند به روش تاگوچی بهینه‌سازی شده است. با توجه به نتایج طراحی آزمایش‌ها به روش تاگوچی، شرایط بهینه برای غلظت اولیه PNP برابر با  $40 \text{ mg L}^{-1}$ ، برای pH برابر با ۳، برای غلظت  $S_2O_8^{2-}$  برابر با  $1 \text{ mM}$  و برای زمان اقامت برابر با  $17/24 \text{ min}$  می‌باشد. در این شرایط مقدار درصد حذف برابر با ۹۸٪ می‌باشد که با مقدار تجربی آن یعنی ۹۵٪ مطابقت خوبی دارد. همچنین روش تاگوچی مؤثرترین پارامتر در حذف PNP را غلظت  $S_2O_8^{2-}$  با سهم ۴۳٪ نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: فتوراکتور جریان پیوسته آنولار، پارانیتروفنل، طراحی تاگوچی،  $UV/S_2O_8^{2-}$

## مقدمه

تمام آب‌های طبیعی دارای آلودگی‌هایی هستند که از فرآیندهای فرسایش، شستشو و هوازگی خاک‌ها ناشی می‌شوند. یکی دیگر از مهم‌ترین عوامل آلودگی‌های آب‌های سطحی، تخلیه پساب‌های صنعتی و فاضلاب‌ها به محیط زیست می‌باشد که اگر بدون تصفیه به محیط زیست وارد شوند می‌توانند به طرق مختلف، اکوسیستم آبی را بطور نامطلوبی تحت تاثیر قرار دهند، لذا برای حفاظت منابع آبی و زیرزمینی و نیز برای دسترسی به آب آشامیدنی مطلوب، لازم است این آلاینده‌ها را از منابع شان حذف کنیم. بسیاری از فرآیندها به منظور تخریب یا تجزیه این عوامل آلاینده، سال‌هاست که بکار برده می‌شوند که از آن جمله می‌توان به فرآیندهای انعقاد، اکسیداسیون شیمیایی، جذب سطحی بر روی کربن فعال شده، اکسیداسیون کاتالیستی و... اشاره کرد (۲-۱).

روش‌های متداول تصفیه پساب‌ها شامل سه دسته می‌باشند (۳):

الف) روش‌های بیولوژیکی

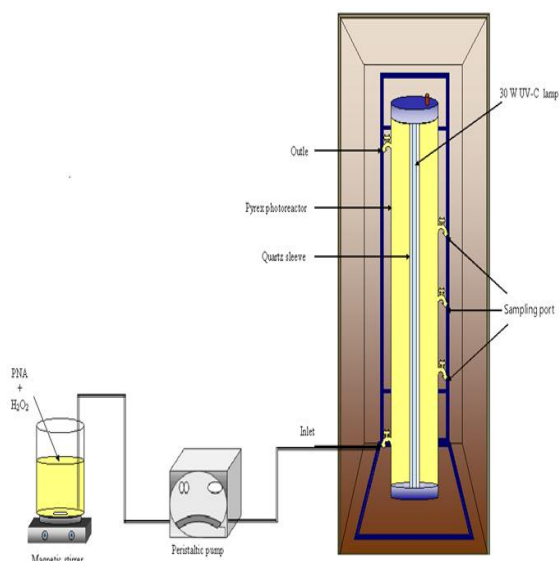
ب) روش‌های فیزیکی

ج) روش‌های شیمیایی

با وجود اینکه روش تصفیه بیولوژیکی روشی مؤثر می‌باشد، اما گاهی در غلظت‌های بسیار بالا و پایین آلاینده‌ها دارای مشکلاتی می‌باشد. در روش‌های فیزیکی مانند جذب سطحی بر روی کربن فعال، عملکرد کربن فعال برای محدوده غلظت‌های  $10-100 \text{ mgL}^{-1}$  مؤثر می‌باشد و فقط به عنوان فرایند انتقال از یک فاز به فاز دیگر عمل می‌کند (۴). از دیگر روش‌های تصفیه فیزیکی روش اسمز معکوس

می‌باشد ولی از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نیست (۵). بطورکلی فرآیندهای مذکور قادر به تخریب و نابودی آلاینده‌های محیط زیست نمی‌باشند. در سال‌های اخیر فرآیندهای اکسایش پیشرفته (AOPs) بسیار مورد توجه بوده و استفاده از آنها رشد چشمگیری داشته است. به طور کلی در فرآیندهای اکسایش پیشرفته رادیکال‌های فعال هیدروکسیل تولید می‌شوند. به خاطر قدرت اکسیدکنندگی بالای رادیکال‌های هیدروکسیل، اغلب فرآیندهای اکسایش پیشرفته بر پایه تولید این گونه استوار هستند. استفاده از اشعه UV و یک ماده اکسیدکننده مناسب مانند  $H_2O_2$  یکی از موثرترین روش‌های اکسایش پیشرفته می‌باشد. این روش در حذف آلاینده‌های آلی مقاوم در برابر تجزیه بیولوژیکی، بسیار مؤثر است (۶). در سال‌های اخیر توجه زیادی به جایگزین نمودن سایر اکسیدکننده‌ها به جای هیدروژن پراکسید صورت گرفته است. پراکسی‌دی‌سولفات یک کاندیدای مناسب برای این منظور است، این ترکیب یک اکسیدکننده قوی بوده و کاربرد زیادی در صنعت نفت دارد. پتاسیم پراکسی‌دی‌سولفات در مقایسه با سایر اکسیدکننده‌ها نظیر هیدروژن پراکسید و ازون ارزان‌تر بوده و کارآیی قابل توجهی از خود نشان داده است (۱۶-۷).

پارانیتروفنل (PNP) یکی از مشتقات فنل می‌باشد. و از مهم‌ترین ترکیباتی است که به عنوان حدواسط یا پیش‌ماده در تولید مواد آلی سنتزی مانند آنتی‌اکسیدان‌ها، مواد افزودنی سوختی، بازدارنده‌های خوردگی، آفت‌کش‌ها، عوامل گندزدا، داروهای ماکیان و سنتزهای دارویی استفاده می‌شود. رهاسازی PNP به طور مستقیم، به دلیل سمیت و سرطان‌زایی



شکل (۱): شمای فتوراکتور پیوسته

#### - روش کار

در هر آزمایش ۲۰۰۰ میلی‌لیتر از محلول PNP (Merck) و پتاسیم پراکسی‌دی‌سولفات (Merck) با غلظت‌های مشخص تهیه و به یک بشر پیرکس که بر روی یک بهم زن مغناطیسی (Ika) قرار گرفته و در طول آزمایش کاملاً هم زده می‌شود منتقل می‌گردد. محلول توسط پمپ پرستالتیک (Heidolph, PD 5001) به فتوراکتور آنولار پیوسته تزریق شده و در خروجی‌های معین، ۱۰ میلی‌لیتر از نمونه جمع‌آوری شده و توسط دستگاه اسپکتروفوتومتر UV/Vis (Ultrospec 2000, Biotech Pharmacia, England) و با استفاده از نمودار کالیبراسیون تهیه شده غلظت باقیمانده PNP، اندازه‌گیری می‌شود. به منظور اندازه‌گیری شدت تابش نور فرابنفش از دستگاه اندازه‌گیری شدت تابش نور (Leybold Co., GmbH) استفاده شده است. شدت تابش در سطح لوله کوارتز برابر با ۴۲ وات بر مترمربع می‌باشد. به منظور طراحی

مشکلات زیست محیطی خیلی جدی را سبب خواهد شد (۱۷).

در این مقاله کارائی فرایند فتواکسیداسیونی  $UV/S_2O_8^{2-}$  در حذف PNP به عنوان یک نمونه از آلاینده‌های محیط زیست در یک فتوراکتور آنولار پیوسته بررسی شده و پارامترهای موثر در فرایند به روش تاگوچی مورد بهینه‌سازی قرار گرفته است.

#### بخش تجربی

##### - مواد مورد استفاده

PNP، پتاسیم پراکسی‌دی‌سولفات ( $K_2S_2O_8$ )، سدیم هیدروکسید (NaOH) و نیتریک اسید ( $HNO_3$ ) از شرکت مرک (Merck) تهیه شده است.

##### - شرح ساختار فتوراکتور مورد استفاده

شمای فتوراکتور پیوسته با تابش از مرکز در شکل ۱ نشان داده شده است. این فتوراکتور از یک راکتور از جنس پیرکس با قطر داخلی ۷۰ میلی‌متر و ضخامت ۲/۵ میلی‌متر و به ارتفاع ۸۰ سانتی‌متر که در فواصل ۲۰ سانتی‌متر از آن سه محل نمونه‌برداری تعبیه شده تشکیل شده است. در مرکز فتوراکتور یک لامپ UV-C، ۳۰ W، با طول موج نشری ۲۵۴ نانومتر (Philips, Holland) در داخل یک لوله کوارتز به قطر داخلی ۳۰ میلی‌متر و ضخامت ۲/۵ میلی‌متر قرار گرفته است. به منظور تزریق محلول از یک پمپ پرستالتیک (Heidolph, PD 5001) با شدت قابل تنظیم استفاده می‌شود. جریان حاوی PNP از ورودی فتوراکتور که در پایین آن تعبیه شده وارد و از آخرین خروجی که در بالای فتوراکتور تعبیه شده خارج می‌شود.

جدول (۱): فاکتورها و سطوح آنها برای طراحی آزمایش

فاکتور	سطح			
	۱	۲	۳	۴
غلظت اولیه PNP ( $mg L^{-1}$ )	۴۰	۵۰	۶۰	۷۰
pH	۹	۷	۵	۳
غلظت $S_2O_8^{2-}$ (mM)	۱/۵	۶	۱۲	۱۸
$\tau$ (min)	۴/۳۱	۸/۶۲	۱۲/۹۳	۱۷/۲۴

بدر نظر گرفتن ۴ فاکتور در ۴ سطح تغییر برای هر کدام، آرایه متعامد مناسب باید برای آن انتخاب شود. از آنجایی که هر فاکتور دارای درجه آزادی ۳ است یعنی کل درجه آزادی برابر ۱۲ خواهد بود لذا آرایه مناسب آرایه  $L_{16}$  خواهد بود. جدول (۲) آرایه  $L_{16}$  مورد نظر را نشان می‌دهد. در این آرایه ۴ فاکتور در ۴ سطح تغییر می‌کنند که هر سطر از ماتریس نشان دهنده یک آزمایش می‌باشد. بنابراین جمعاً ۱۶ آزمایش با در نظر گرفتن شرایط سطوح برای بهینه‌سازی و تعیین درجه تاثیر هر کدام از فاکتورها لازم خواهد بود. نتایج هر آزمایش با ۳ بار تکرار در جدول (۳) آرایه شده است.

آزمایش به روش طراحی تاگوچی از نرم افزار Qualitek-4 استفاده شده است.

### نتایج و بحث

- بهینه‌سازی کارایی فتوراکتور پیوسته در حذف PNP به منظور بدست آوردن حداکثر اطلاعات برای بهینه‌سازی کارایی فتوراکتور آنولار پیوسته در حذف PNP در فرآیند  $UV/S_2O_8^{2-}$  و همین‌طور تعیین سهم هر یک از پارامترهای مؤثر در راندمان حذف، از روش طراحی آزمایش با استفاده از روش تاگوچی بهره برده شده است. در این روش از خاصیت آرایه‌های متعامد برای بدست آوردن تعداد آزمایش‌های لازم استفاده می‌شود. در این قسمت چهار متغیر شامل غلظت اولیه PNP، pH، غلظت  $S_2O_8^{2-}$  و زمان اقامت ( $\tau$ ) به عنوان متغیرهای اصلی مؤثر در کارایی فتوراکتور در نظر گرفته شده‌اند. هر کدام از این فاکتورها در چهار سطح تغییر می‌کنند. فاکتورهای مورد استفاده و سطوح هر کدام از آنها در جدول (۱) نشان داده شده است. در صورت بکارگیری روش فاکتوریال کامل برای طراحی آزمایش تعداد ۴<sup>۴</sup> آزمایش یعنی ۲۵۶ آزمایش بایستی صورت گیرد. همانطوری که مشخص است بکارگیری روش فاکتوریال کامل نیاز به تعداد آزمایشات زیادی دارد. بدین سبب استفاده از یکی از روش‌های طراحی آزمایش برای بهینه‌سازی فرآیند لازم است.

جدول (۲): آرایه متعامد L16 برای طراحی آزمایش

شماره آزمایش	سطوح فاکتورها			
	غلظت اولیه PNP	pH	غلظت $S_2O_8^{2-}$	$\tau$
۱	۱	۱	۱	۱
۲	۱	۲	۲	۲
۳	۱	۳	۳	۳
۴	۱	۴	۴	۴
۵	۲	۱	۲	۳
۶	۲	۲	۱	۴
۷	۲	۳	۴	۱
۸	۲	۴	۳	۲
۹	۳	۱	۳	۴
۱۰	۳	۲	۴	۳
۱۱	۳	۳	۱	۲
۱۲	۳	۴	۲	۱
۱۳	۴	۱	۴	۲
۱۴	۴	۲	۳	۱
۱۵	۴	۳	۲	۴
۱۶	۴	۴	۱	۳

- تعیین شرایط بهینه کارایی فتوراکتور پیوسته

برای تعیین شرایط بهینه و سهم هر یک از پارامترهای مؤثر از روش آنالیز استاندارد و رسم نمودارهای مربوطه استفاده شده است. مقدار پاسخ متوسط در جدول (۳) گزارش شده است. میانگین مقادیر پاسخ متوسط برای هر سطح از پارامترها به عنوان مقدار متوسط پاسخ در جدول (۴) گزارش شده است.

جدول (۴): پاسخ آنالیز تاگوچی کارایی فتوراکتور لوله‌ای پیوسته

فاکتور	پاسخ متوسط			
	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳	سطح ۴
غلظت اولیه PNP ( $mg L^{-1}$ )	۶۳/۲۶	۳۹/۲۶	۳۸/۲۳	۲۹/۵۰
pH	۳۷/۸۲	۴۰/۵۶	۴۴/۷۴	۴۷/۱۱
غلظت $S_2O_8^{2-}$ (mM)	۱۸/۷۲	۳۸/۰۹	۵۴/۹۷	۵۸/۴۶
$\tau$ (min)	۲۳/۵۹	۴۰/۳۳	۴۹/۴۶	۵۶/۸۶

جدول (۳): نتایج آزمایشات و مقدار پاسخ متوسط بر اساس آرایه L16

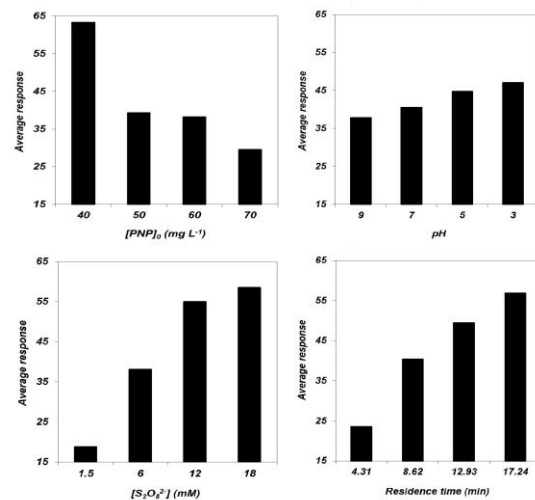
شماره آزمایش	درصد حذف در دفعات تکرار			مقدار پاسخ متوسط
	۱	۲	۳	
۱	۱۶/۳۲	۱۶/۵۰	۱۶/۸۷	۱۶/۵۶
۲	۵۱/۹۶	۵۱/۸۲	۵۲/۲۰	۵۱/۹۹
۳	۸۵/۹۴	۸۵/۸۰	۸۶/۰۲	۸۵/۹۲
۴	۹۸/۸۰	۹۷/۹۰	۹۹/۰۰	۹۸/۵۷
۵	۳۷/۲۷	۳۷/۱۲	۳۸/۱۰	۳۷/۵۰
۶	۲۸/۷۲	۲۸/۹۰	۲۹/۰۸	۲۸/۹۰
۷	۳۵/۵۸	۳۵/۸۰	۳۶/۰۰	۳۵/۷۹
۸	۵۴/۶۰	۵۵/۱۰	۵۴/۸۰	۵۴/۸۳
۹	۵۷/۲۸	۵۷/۶۰	۵۸/۰۰	۵۷/۶۳
۱۰	۵۹/۸۵	۵۹/۸۰	۶۰/۰۰	۵۹/۸۸
۱۱	۱۴/۷۷	۱۴/۹۰	۱۵/۰۰	۱۴/۸۹

در شکل (۲)، پاسخ متوسط بر حسب هر پارامتر نشان داده شده است. از آنجایی که در روش مورد استفاده در این کار، حالت پاسخ از نوع بیشتر بهتر می باشد هر چه نسبت متوسط میانگین در یک سطح بیشتر باشد آن سطح از فاکتور مورد نظر بهینه خواهد بود. با توجه به نتایج، شرایط بهینه برای غلظت اولیه PNP، سطح ۱ ( $40 mg L^{-1}$ )، برای مقدار pH، سطح ۴ (۳)، برای غلظت  $S_2O_8^{2-}$  سطح ۴ (mM)

- تعیین سهم پارامترهای عملیاتی در کارایی فتوراکتور پیوسته

در روش تاگوچی با استفاده از آنالیز واریانس (ANOVA) اثر هر کدام از پارامترهای ورودی و سهم هر کدام از فاکتورها در پاسخ تعیین می‌شود. نتایج آنالیز ANOVA در جدول (۵) گزارش شده است. با توجه به جدول (۵) و شکل (۳)، غلظت S<sub>2</sub>O<sub>8</sub><sup>2-</sup> با ۴۳٪ بیشترین تاثیر و pH با ۲٪ کمترین تاثیر را در راندمان فرآیند دارند. همچنین غلظت PNP با ۲۷٪ مقام دوم و زمان اقامت با ۲۷٪ مقام سوم را در تاثیرگذاری بر راندمان فرآیند به خود اختصاص داده است.

(۱۸) و برای زمان اقامت، سطح ۴ (۱۷/۲۴ min) می‌باشد. در این شرایط مقدار درصد حذف برابر با ۹۸٪ می‌باشد که با مقدار تجربی آن یعنی ۹۵٪ مطابقت خوبی دارد.



شکل (۲): تاثیر هر پارامتر بر مقادیر پاسخ متوسط

جدول (۵): نتایج مربوط به تحلیل واریانس برای تعیین درصد تاثیر پارامترهای مختلف در کارایی فتوراکتور پیوسته

Percent	Pure Sum (S')	F-ratio	Variance (V)	Sum of Squares (S)	DOF	فاکتور
۲۷/۲۸	۷۵۳۶/۱۹	۷۸۵/۱۸	۲۵۱۵/۲۷	۷۵۴۵/۷۹	۳	غلظت اولیه PNP (mg L <sup>-1</sup> )
۲/۲۲	۶۱۳/۶۴	۶۴/۸۵	۲۰۷/۷۵	۶۲۳/۲۵	۳	pH
۴۳/۱۸	۱۱۹۲۰/۷۴	۱۲۴۲/۳۵	۳۹۷۹/۷۸	۱۱۹۳۹/۳۴	۳	غلظت S <sub>2</sub> O <sub>8</sub> <sup>2-</sup> (mM)
۲۶/۷۷	۷۳۹۵/۵۵	۷۷۰/۵۵	۲۴۶۸/۳۸	۷۴۰۵/۱۶	۳	τ (min)
۰/۵۵	-	-	۳/۲۰	۱۱۲/۱۹	۳	خطا

perspectives of electrocoagulation, Journal of Hazardous Materials, 114, 199.

[3] Behnajady, M.A., Modirshala, N., Daneshvar, N., Rabbani, M., 2007, Photocatalytic degradation of an azo dye in a tubular continuous-flow photoreactor with immobilized TiO<sub>2</sub> on glass plates, Chemical Engineering Journal, 127, 167.

[4] De, A.K., Bhattacharjee, S. Dutta, B.K., 1997, Kinetics of phenol photooxidation by hydrogen peroxide and ultraviolet radiation, Industrial & Engineering Chemistry Research, 36, 3607.

[5] Galindo, C. Kalt, A., 1998, UV-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> Oxidation of monoazo dyes in aqueous media: a kinetic study, Dyes and Pigments, 40, 27.

[6] Legrini, O., Oliveros, E., Braun, A.M., 1993, Photochemical processes for water treatment, Chemical Reviews, 93, 671.

[7] Ding, X., Gutierrez, L., Croue, J.-P., Li, M., Wang, L., Wang, Y., 2020, Hydroxyl and sulfate radical-based oxidation of RhB dye in UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and UV/persulfate systems: Kinetics, mechanisms, and comparison, Chemosphere, 253, 126655.

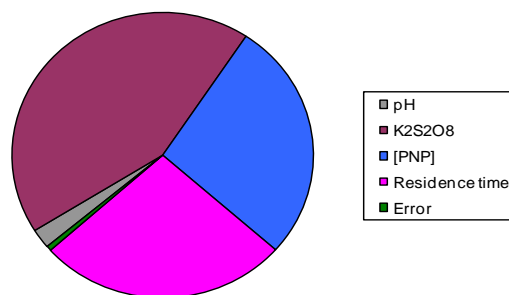
[8] Chen, L., Cai, T., Cheng, C., Xiong, Z., Ding, D., 2018, Degradation of acetamiprid in UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and UV/persulfate systems: A comparative study, Chemical Engineering Journal, 351, 1137.

[9] Liu, X., Liu, Y., Lu, S., Wang, Z., Wang, Y., Zhang, G., Guo, X., Guo, W., Zhang, T., Xi, B., 2020, Degradation difference of ofloxacin and levofloxacin by UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and UV/PS (persulfate): Efficiency, factors and mechanism, Chemical Engineering Journal, 385, 123987.

[10] Lee, Y.-M., Lee, G., Zoh, K.-D., 2021, Benzophenone-3 degradation via UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and UV/persulfate reactions, Journal of Hazardous Materials, 403, 123591.

[11] Ramakrishnan, R.K., Venkateshaiah, A., Gröbel, K., Kudlek, E., Silvestri, D., Padil, V.V.T., Ghanbari, F., Černík, M., Waclawek, S., 2023, UV-activated persulfates oxidation of anthraquinone dye: Kinetics and ecotoxicological assessment, Environmental Research, 229, 115910.

[12] Wei-Po Lai, W., Lin, J.-C., Li, M.-H., 2023, Degradation of benzothiazole by the UV/persulfate process: Degradation kinetics, mechanism and toxicity, Journal of



شکل (۳): سهم فاکتورهای مؤثر در کارایی فتوراکتور پیوسته

### نتیجه‌گیری

نتایج نشان می‌دهد که فتوراکتور آنولار پیوسته به طور مؤثری می‌تواند در حذف PNP با غلظت‌های اولیه نسبتاً بالا تحت فرآیند UV/S<sub>2</sub>O<sub>8</sub><sup>2-</sup> مورد استفاده قرار گیرد. پارامترهای عملیاتی نظیر غلظت اولیه PNP، غلظت اولیه S<sub>2</sub>O<sub>8</sub><sup>2-</sup>، زمان اقامت در فتوراکتور و pH محلول در راندمان حذف PNP تأثیرگذار هستند و می‌توان با انتخاب شرایط مطلوب راندمان حذف را به طور قابل توجهی افزایش داد. طراحی آزمایش به روش تاگوچی نشان می‌دهد که از پارامترهای مؤثر در راندمان حذف، بیش‌ترین تأثیر مربوط به غلظت S<sub>2</sub>O<sub>8</sub><sup>2-</sup> بوده و کم‌ترین تأثیر را pH دارد. راندمان حذف در شرایط بهینه پیش‌بینی شده به روش طراحی آزمایش تاگوچی (۹۸٪) مطابقت خوبی با راندمان حذف تجربی (۹۵٪) دارد.

### تعارض منافع

نویسنده هیچ‌گونه تعارض منافی برای اعلام ندارد.

### منابع

- [1] Holt, P.K., Borton, G.W., Mitchell, C.A., 2005, The future for electrocoagulation as a localized water treatment technology, Chemosphere, 59, 355.
- [2] Mollah, M.Y.A., Morkovshy, P., Gomes, J.A.G., Kesmez, M., Paga, J., Cocke, D.L., 2004, Fundamentals, present and future

Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, 436, 114355.

[13] Uwayezu, J.N., Carabante, I., Van Hees, P., Karlsson, P., Kumpiene, J., 2023, Validation of UV/persulfate as a PFAS treatment of industrial wastewater and environmental samples, Journal of Water Process Engineering, 53, 103614.

[14] Wang, Y., Zhou, J., Bi, W., Qin, J., Wang, G., Wang, Z., Fu, P., Liu, F., 2022, Schwertmannite catalyze persulfate to remove oxytetracycline from wastewater under solar light or UV-254, Journal of Cleaner Production, 364, 132572.

[15] Wang, M., Wang, Q., Cai, Y., Yuan, R., Wang, F., Qian, Y., Chen, Z., Zhou, B., Chen, H., 2021, Efficient degradation and defluorination of perfluorobutyric acid under UV irradiation in the presence of persulfate, Journal of Cleaner Production, 327, 129472.

[16] Fang, Z., Huang, R., Chelme-Ayala, P., Shi, Q., Xu, C., Gamal El-Din, M., 2019, Comparison of UV/Persulfate and UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> for the removal of naphthenic acids and acute toxicity towards *Vibrio fischeri* from petroleum production process water, Science of The Total Environment, 694, 133686.

[17] Sun, J.H., Sun, S.P., Fan, M.H., Guo, H.Q., Lee, Y.F., Sun, R.X., 2008, Oxidative decomposition of p-nitroaniline in water by solar photo-Fenton advanced oxidation process, Journal of Hazardous Materials, 153, 187.



“Research article”

## Removal of p-nitrophenol from aqueous environments by UV/S<sub>2</sub>O<sub>8</sub><sup>2-</sup> process in a continuous photoreactor: Optimization by Taguchi method

### Removal of p-nitrophenol by UV/S<sub>2</sub>O<sub>8</sub><sup>2-</sup> process

Seyyed Hamed Zafari\*

Department of Applied Chemistry, Faculty of Chemistry, Semnan University, Semnan, Iran

\*Corresponding author: seyyed.hamed.zafari@gmail.com

(Received: 2023 October 22, Accepted: 2023 December 3)

#### Abstract

The present research was an attempt to investigate the removal of an organic pollutant called p-nitrophenol (PNP) using the UV/S<sub>2</sub>O<sub>8</sub><sup>2-</sup> process in a continuous annular photoreactor in order to optimize the operating conditions effective in the efficiency of the process through the Taguchi method. According to the results of the Taguchi method, the optimal conditions for initial concentration of PNP was equal to 40 mg L<sup>-1</sup> with pH equal to 3 and S<sub>2</sub>O<sub>8</sub><sup>2-</sup> concentration equal to 18 mM in a residence time of 17.24 min. In such conditions, the removal percentage is equal to 98%, which is in good agreement with its experimental value of 95%. Furthermore, the Taguchi method showed that the most effective parameter in the removal of PNP was the concentration of S<sub>2</sub>O<sub>8</sub><sup>2-</sup> with a contribution of 43%.

**Conflict of interest:** None declared.

**Keywords:** Continuous annular photoreactor, p-nitrophenol, Taguchi method, UV/S<sub>2</sub>O<sub>8</sub><sup>2-</sup>





دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز  
فصلنامه آلودگی‌های محیطی و توسعه پایدار شهری

دوره اول، شماره ۱، پیاپی ۱  
بهار ۱۴۰۳، صفحات ۵۱-۴۳

## "مقاله پژوهشی"

# حذف فوتوکاتالیزوری رنگزای رودامین ب توسط $\text{SnIn}_4\text{S}_8$ : بهینه‌سازی فرآیند به روش سطح پاسخ

حذف فوتوکاتالیزوری رودامین ب توسط  $\text{SnIn}_4\text{S}_8$

علی مهری‌زاد<sup>۱\*</sup>

<sup>۱</sup>دانشیار گروه شیمی، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

<sup>۲</sup>مرکز تحقیقات نانو فناوری صنعتی، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

\*نویسنده مسئول مکاتبات: mehrizad@iaut.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۳/۰۴، پذیرش نهایی: ۱۴۰۳/۰۳/۱۹)

## چکیده

در این مطالعه، عملکرد قلع ایندیوم سولفید ( $\text{SnIn}_4\text{S}_8$ ) در حذف فوتوکاتالیزوری رنگزای رودامین ب (RhB) به عنوان یک نمونه از آلاینده‌های محیط زیست، مورد بررسی قرار گرفت. از طراحی آزمایش به روش سطح پاسخ (RSM) جهت بهینه‌سازی متغیرهای عملیاتی (غلظت اولیه RhB، مقدار  $\text{SnIn}_4\text{S}_8$ ، pH محلول و زمان تابش نور) استفاده شد. بر اساس نتایج، حداکثر راندمان حذف RhB به مقدار ۸۱/۱۵٪ در شرایط بهینه حاصل شد. راندمان تئوری حاصل از طراحی آزمایش به روش تجربی نیز تأیید شد (۷۸/۹۶٪) و از این طریق، دقت و صحت مدل پیشنهادی مورد تأیید واقع شد. مطالعه سینتیک حذف فوتوکاتالیزوری رنگزای RhB توسط  $\text{SnIn}_4\text{S}_8$  نشان داد که فرآیند مذکور از مدل سینتیکی شبه درجه اول با ثابت سرعت  $0.047 \text{ min}^{-1}$  تبعیت می‌کند. در واقع، فعالیت فوتوکاتالیزوری چشمگیر  $\text{SnIn}_4\text{S}_8$  ناشی از ساختار گل مانند آن است که باعث افزایش جذب فوتون‌های نور و جذب سطحی بیشتری از گونه آلاینده می‌شود.

واژه‌های کلیدی: قلع ایندیوم سولفید، رودامین ب، فرآیند فوتوکاتالیزوری، روش سطح پاسخ، سینتیک

## مقدمه

افزایش جمعیت جهانی و گسترش روزافزون صنعت، سبب ایجاد آلودگی‌های زیست محیطی شده است که به عنوان یکی از چالش‌های مهم دنیای امروزی است. آلودگی‌های محیط زیست می‌تواند اثرات مخربی بر جوامع انسانی و اکوسیستم داشته باشد. در سال‌های اخیر مسائل مربوط به آب در کانون توجه همگان قرار گرفته است. تشدید فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی و دفع مواد شیمیایی به پهنه‌های آبی منجر به آلودگی سفره‌های آب‌های زیرزمینی، رودخانه‌ها، دریاچه‌ها و اقیانوس‌ها شده است (۱). آلاینده‌های رنگی به عنوان اولین آلاینده قابل تشخیص توسط چشم انسان، یکی از چالش‌برانگیزترین مسائل زیست محیطی هستند. آلودگی محیط‌های آبی توسط مواد رنگزانه منجر به چهره نازیبای محیط‌های آبی می‌شود، بلکه صدمات جبران‌ناپذیری بر اکوسیستم‌های آبی وارد می‌کند. کدورت ایجاد شده در اثر ترکیبات رنگی، مانع از نفوذ نور خورشید به درون آب شده و از این طریق منجر به ایجاد اختلال در عملکرد و فوتوسنتز گیاهان آبی می‌شود (۲). صنایع نساجی از عمده‌ترین مصرف‌کنندگان آب هستند که روزانه مقدار قابل توجهی پساب حاوی ترکیبات رنگی وارد محیط زیست می‌کنند. میزان مصرف مواد رنگزا در چنین صنایعی بیش از ۱۰۰۰۰ تن در سال تخمین زده می‌شود که با این میزان مصرف، سالیانه ۱۰۰۰ تن از رنگزاهای مصرفی وارد پساب چنین صنایعی می‌شود (۳). رودامین ب<sup>۱</sup> (RhB) از جمله مواد رنگزای مورد استفاده در صنایع

نساجی است. همچنین به دلیل خاصیت فلئوئورسانسی، به طور گسترده‌ای در برنامه‌های زیست‌فناوری مانند میکروسکوپ فلئوئورسانسی از آن استفاده می‌گردد. از این ماده رنگزا غالباً به عنوان ردیاب برای تعیین جهت و مقدار جریان آب استفاده شده است و به عنوان ردیاب آب در صنایع سدسازی نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. رودامین ب بسیار محلول در آب است و در گروه رنگ‌های بازی از نوع زانتان قرار می‌گیرد. سمیت این رنگزا برای انسان و حیوانات به اثبات رسیده است و اگر بلعیده شود باعث تحریک پوست، چشم و دستگاه تنفسی می‌شود و به عنوان ماده سرطان‌زا برای جانداران به ویژه انسان محسوب می‌شود (۵-۶). با توجه به چنین آسیب‌های جدی، لزوم حذف ترکیبات رنگزا قبل از ورود به محیط زیست، امری اجتناب‌ناپذیر است. تاکنون روش‌های سنتی و تکنیک‌های مدرن مختلفی برای از بین بردن چنین آلاینده‌هایی پیشنهاد و اجرا شده است. فرآیندهای انعقاد، فیلتراسیون و روش‌های بیولوژیکی از جمله روش‌های مورد استفاده در حذف مواد رنگزا هستند، ولی به دلیل برخی معایب از جمله سرعت حذف ناقص، آلودگی ثانویه یا تولید لجن سمی رضایت بخش نیستند (۹-۱۶). در سال‌های اخیر، فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته، به‌ویژه فرآیند فوتوکاتالیزوری به دلیل توانایی تبدیل آلاینده‌های آلی و معدنی به محصولات بی‌ضرر، به عنوان فناوری‌های جایگزین امیدوارکننده در نظر گرفته شده‌اند. اساس کار فرآیندهای فوتوکاتالیزوری بر تابش فوتون‌های نور با انرژی مناسب بر سطح نیم‌رسانا و متعاقب آن، برانگیختگی الکترون از نوار ظرفیت به نوار رسانایی و تولید

<sup>۱</sup> Rhodamine B

فوتوکاتالیزوری قلع ایندیوم سولفید ( $\text{SnIn}_4\text{S}_8$ ) با ساختار ویژه گل مانند در حذف رنگزای RhB از محلول‌های آبی تحت تابش نور مرئی است. برای ارزیابی نقش متغیرهای عملیاتی و بهینه‌سازی فرآیند از طراحی آزمایش به روش سطح پاسخ<sup>۴</sup> (RSM) استفاده شد. همچنین، سیتیک فرآیند فوتوکاتالیزوری نیز مورد ارزیابی قرار گرفت.

### روش تحقیق

#### مواد

رنگزای رودامین ب ( $\text{C}_{28}\text{H}_{31}\text{Cl N}_2\text{O}_3$ ) از شرکت مرک آلمان خریداری شد. پودر قلع ایندیوم سولفید ( $\text{SnIn}_4\text{S}_8$ ) با ساختار گل مانند طی تحقیق جداگانه-ای سنتز شد (۱۴).

#### روش‌ها

آزمایش‌های فوتوکاتالیزوری در درون یک کریستالیزور بر روی همزن مغناطیسی با همزدن mL ۱۰۰ از محلول RhB با غلظت و pH مناسب به همراه مقدار معینی از کاتالیزور ( $\text{SnIn}_4\text{S}_8$ ) انجام شد. ابتدا سوسپانسیون حاصل در تاریکی به مدت یک ساعت همزده شد تا تعادل جذب-واجذب بررسی شود. سپس، تابش‌دهی با استفاده از لامپ مرئی اوسرام (۳۰۰ W) مجهز به فیلتر حذف کننده نور UV که در قسمت بالای یک محفظه چوبی نصب شده بود انجام شد. پس از مدت زمان‌های معین، مقدار مناسبی از محلول، نمونه‌برداری شد و پس از عمل سانتریفیوژ، مقدار جذب محلول با استفاده از دستگاه اسپکتروفوتومتر تک شعاعی در طول موج جذب ماکزیمم رنگزای RhB (۵۵۳ nm) تعیین شد.

جفت‌های الکترون - حفره و گونه‌های فعال‌استوار است. در این چشم انداز، انتخاب یک نیم‌رسانای مناسب و کم هزینه و فعال تحت نور مرئی بسیار حائز اهمیت است. با توجه به خواص ویژه مواد سولفیدی سه‌تایی، تحقیقات زیادی در زمینه استفاده از این ترکیبات به عنوان فوتوکاتالیزورهای نور مرئی گزارش شده است (۱۱-۱۰). قلع ایندیوم سولفید ( $\text{SnIn}_4\text{S}_8$ ) یک کالکوژنید سه‌تایی با دو ساختار بلوری مکعبی و شش ضلعی است که با توجه به شکاف نواری نسبتاً باریک، پایداری بالا و ظرفیت جذب قوی نور مرئی، کاربردهای بالقوه‌ای در فوتوکاتالیز دارد. پینگفان<sup>۲</sup> و همکارانش (۲۰۱۸) کامپوزیت دو تایی قلع ایندیوم سولفید و گرافن اکسید کاهش یافته ( $\text{rGO/SnIn}_4\text{S}_8$ ) را به روش هیدروترمال سنتز کردند و کاربرد آن در حذف یون  $\text{Cr(VI)}$  از محلول‌های آبی را بررسی کردند. مشخصه‌یابی کامپوزیت سنتز شده نشان داد که نانوصفحات  $\text{SnIn}_4\text{S}_8$  به طور یکنواخت بر روی سطح rGO توزیع شده‌اند و کامپوزیت سنتز شده فعالیت فوتوکاتالیزوری بسیار خوبی را تحت نور مرئی از خود نشان داد (۱۲). در سال ۲۰۲۱ زانگ<sup>۳</sup> و همکارانش تخریب فوتوکاتالیزوری رنگزای متیل اورانژ و فلز سنگین  $\text{Cr(VI)}$  را در حضور کاتالیزور  $\text{CdS/SnIn}_4\text{S}_8$  و تحت نور مرئی مورد بررسی قرار دادند. نتایج داد که بیش از ۹۸٪ از فلز سنگین (۲۰ میلی گرم بر لیتر) و تقریباً تمام ماده رنگزا (۱۵ میلی گرم بر لیتر) در مدت زمان کمتر از ۲۴ دقیقه تخریب شدند (۱۳). هدف از تحقیق حاضر، ارزیابی عملکرد

<sup>۲</sup> Pingfan

<sup>۳</sup> Zhang

<sup>۴</sup> Response surface methodology

در این رابطه  $y$  پاسخ،  $\beta_0$  ضریب ثابت،  $\beta_i$  ضریب اثرات خطی،  $\beta_{ii}$  ضریب اثرات مربعی،  $\beta_{ij}$  ضریب اثرات متقابل،  $x_i$  و  $x_j$  متغیرها و  $\varepsilon$  مقدار باقی‌مانده است.

مطالعه از نوع طراحی ترکیب مرکزی<sup>5</sup> (CCD) و مدل مرتبه دوم بود. در این روش تأثیر چهار متغیر مستقل، شامل غلظت اولیه RhB، مقدار کاتالیزور، pH و مدت زمان تابش‌دهی بر میزان پاسخ (راندمان حذف RhB) بررسی شد که حدود و سطوح این متغیرها در جدول (۱) آورده شده است.

جدول (۱): متغیرها و سطوح آن‌ها در طراحی آزمایش به

روش RSM					
محدوده و سطوح متغیرها					
متغیر	$-\alpha$ (-۲)	-۱	۰	+۱	$+\alpha$ (+۲)
[RhB] <sub>0</sub> (mg L <sup>-1</sup> )	۲	۴	۶	۸	۱۰
[Catalyst] <sub>0</sub> (g L <sup>-1</sup> )	۰/۵	۰/۷۵	۱	۱/۲۵	۱/۵
pH	۳	۵	۷	۹	۱۱
Time (min)	۳۰	۶۰	۹۰	۱۲۰	۱۵۰

## نتایج و بحث

طراحی آزمایش و بهینه‌سازی فرآیند حذف فوتوکاتالیزوری رنگزای RhB توسط SnIn<sub>4</sub>S<sub>8</sub> تحت تابش نور مرئی با استفاده از طراحی ترکیب مرکزی (CCD) بر پایه RSM انجام شد. با توجه به حدود و سطوح متغیرهای عملیاتی مندرج در جدول (۱)، آزمایش‌های فوتوکاتالیزوری با نرم‌افزار DX-7 مطابق جدول (۲) طراحی شد.

جهت بدست آوردن آثار اصلی و متقابل متغیرهای مستقل تأثیرگذار بر میزان پاسخ در بررسی حذف RhB توسط فرآیند فوتوکاتالیزوری از طراحی آزمایش استفاده شد.

طراحی آزمایش دانشی است که به کمک آن می‌توان اثرپذیری هر یک از عوامل موثر بر فرآیند را بر مشخصه‌های خروجی به شکل یک معادله بیان نمود. از اهداف طراحی آزمایش می‌توان به کاهش تعداد آزمایش‌ها، کاهش هزینه‌ها و ارزیابی برهکمنش متقابل بین متغیرها اشاره کرد. حذف فاکتورهای غیرضروری، تعیین میزان خطا و تعیین شرایط بهینه از دیگر اهداف طراحی آزمایش می‌باشد. از جمله روش‌های پرکاربرد طراحی آزمایش می‌توان به روش سطح پاسخ اشاره کرد. روش سطح پاسخ یا روش رویه پاسخ که به اختصار RSM نامیده می‌شود، مجموعه‌ای از تکنیک‌های آماری است که در بهینه‌سازی فرآیندهایی بکار می‌رود که پاسخ مورد نظر تحت تأثیر تعدادی از متغیرهاست. شمای گرافیکی مدل ریاضی سبب تعریف واژه سطح یا رویه پاسخ شده است. با کمک این طرح آماری، تعداد آزمایش‌ها کاهش یافته و کلیه ضرایب مدل رگرسیون درجه دوم و اثر متقابل فاکتورها قابل برآورد هستند. روش سطح پاسخ کمکی مضاعف برای یافتن حالت بهینه فاکتورها می‌کند و نشان‌دهنده چگونگی تأثیر فاکتورها بر نتایج آزمایش است. در این روش، پاسخ به صورت یک سطح یا رویه ارائه می‌شود و از یک چند جمله‌ای برای مدل‌سازی پاسخ استفاده می‌گردد. مدل مرتبه دوم به صورت رابطه (۱) است:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (1)$$

<sup>5</sup> Central composite design

جدول (۲): آزمایشات طراحی شده به همراه نتایج تجربی و

تئوری

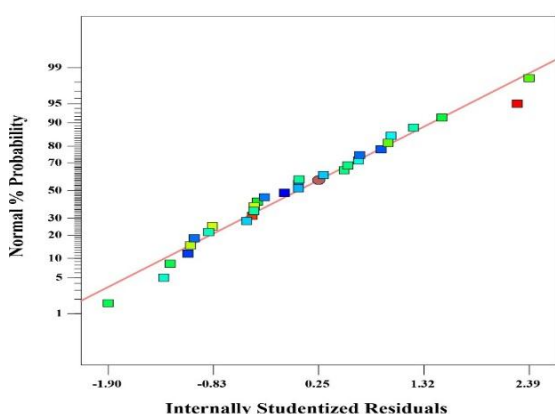
شماره آزمایش	پارامترهای عملیاتی			راندمان حذف (%)		
	[RhB] <sub>0</sub> (mg L <sup>-1</sup> )	[Catalyst] <sub>0</sub> (g L <sup>-1</sup> )	pH	Time (min)	تجربی	تئوری
۱	۴	۰/۷۵	۵	۶۰	۶۳/۴۶	۶۳/۴۶
۲	۸	۰/۷۵	۵	۶۰	۵۲/۵۷	۵۲/۵۷
۳	۴	۱/۲۵	۵	۶۰	۷۲/۳۸	۷۲/۳۸
۴	۸	۱/۲۵	۵	۶۰	۶۰/۹۱	۶۰/۹۱
۵	۴	۰/۷۵	۹	۶۰	۷۳/۰۳	۷۳/۰۳
۶	۸	۰/۷۵	۹	۶۰	۶۰/۹۷	۶۰/۹۷
۷	۴	۱/۲۵	۹	۶۰	۸۵/۸۰	۸۵/۸۰
۸	۸	۱/۲۵	۹	۶۰	۷۳/۱۹	۷۳/۱۹
۹	۴	۰/۷۵	۵	۱۲۰	۷۵/۸۲	۷۵/۸۲
۱۰	۸	۰/۷۵	۵	۱۲۰	۶۵/۵۲	۶۵/۵۲
۱۱	۴	۱/۲۵	۵	۱۲۰	۷۸/۵۶	۷۸/۵۶
۱۲	۸	۱/۲۵	۵	۱۲۰	۶۷/۷۰	۶۷/۷۰
۱۳	۴	۰/۷۵	۹	۱۲۰	۸۵/۷۵	۸۵/۷۵
۱۴	۸	۰/۷۵	۹	۱۲۰	۷۴/۳۱	۷۴/۳۱
۱۵	۴	۱/۲۵	۹	۱۲۰	۹۲/۳۶	۹۲/۳۶
۱۶	۸	۱/۲۵	۹	۱۲۰	۸۰/۳۷	۸۰/۳۷
۱۷	۲	۱/۰۰	۷	۹۰	۷۸/۹۵	۷۸/۹۵
۱۸	۱۰	۱/۰۰	۷	۹۰	۵۶/۰۴	۵۶/۰۴
۱۹	۶	۰/۵۰	۷	۹۰	۶۶/۷۶	۶۶/۷۶
۲۰	۶	۱/۵۰	۷	۹۰	۸۱/۷۱	۸۱/۷۱
۲۱	۶	۱/۰۰	۳	۹۰	۵۹/۳۱	۵۹/۳۱
۲۲	۶	۱/۰۰	۱۱	۹۰	۸۱/۵۱	۸۱/۵۱
۲۳	۶	۱/۰۰	۷	۳۰	۶۸/۷۹	۶۸/۷۹
۲۴	۶	۱/۰۰	۷	۱۵۰	۸۸/۳۱	۸۸/۳۱
۲۵	۶	۱/۰۰	۷	۹۰	۷۰/۴۷	۷۰/۴۷
۲۶	۶	۱/۰۰	۷	۹۰	۷۰/۴۷	۷۰/۴۷
۲۷	۶	۱/۰۰	۷	۹۰	۷۰/۴۷	۷۳/۸۰
۲۸	۶	۱/۰۰	۷	۹۰	۷۰/۴۷	۷۱/۲۸
۲۹	۶	۱/۰۰	۷	۹۰	۷۰/۴۷	۶۹/۴۳
۳۰	۶	۱/۰۰	۷	۹۰	۷۰/۴۷	۶۹/۵۱

تعداد ۳۰ آزمایش بر اساس پیشنهاد نرم افزار انجام شد که پس از وارد کردن نتایج تجربی در نرم افزار، معادله چند جمله‌ای برای پیش‌بینی مقادیر راندمان حذف RhB پیشنهاد شد:

$$R(\%) = 70.47 - 5.73 [RhB]_0 + 3.74 [Catalyst]_0 + 5.55 pH + 4.88 Time + 2.02 Time^2 \quad (2)$$

برای تجزیه و تحلیل مدل از روش تحلیل واریانس استفاده شد که بر اساس این تحلیل مشخص شد که معادله پیشنهاد شده از صحت و دقت مناسبی برخوردار است (مقدار F : ۵۶/۲۹؛ مقدار p : کمتر از ۰/۰۰۰۱).

همچنین به منظور ارزیابی اعتبار مدل، مقادیر باقیمانده (اختلاف بین پاسخ‌های تجربی و تئوری) محاسبه شد. در شکل (۱) توزیع مقادیر باقیمانده بر حسب درصد فراوانی حاصل (توزیع نرمال) رسم شده است. خطی بودن منحنی توزیع نرمال برای باقیمانده‌ها بیانگر صحیح بودن مدل ارائه شده است.



شکل (۱): منحنی فراوانی توزیع نرمال بدست آمده از روش

RSM

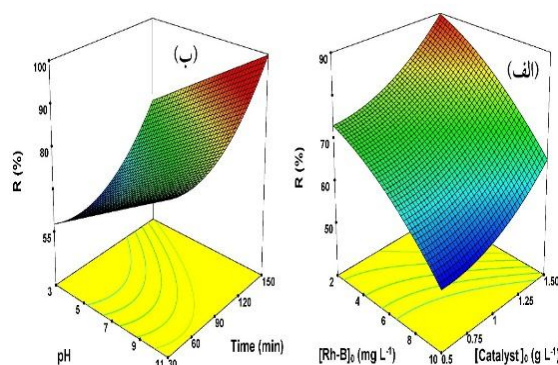
پس از مطالعات آماری مبنی بر بررسی دقت و صحت مدل ارائه شده توسط RSM، نمودارهای سه

مقدار کاتالیزور، تعداد فوتون‌های نور مرئی جذب شده و در نتیجه تعداد الکترون-حفره‌های تولید شده افزایش می‌یابد (۱۷).

با توجه به شکل (۲-ب) راندمان حذف RhB با افزایش pH محلول و مدت زمان تابش‌دهی افزایش می‌یابد. دلیل اصلی افزایش راندمان حذف رنگزا با افزایش مقدار pH محلول را می‌توان به برهمکنش‌های الکترواستاتیکی میان مولکول‌های رنگزا و سطح کاتالیزور نسبت داد. در حالی‌که رنگزای RhB یک ترکیب کاتیونی است؛ برهمکنش‌های جاذبه الکترواستاتیکی میان مولکول‌های رنگزا و سطح پوشیده شده کاتالیزور با یون‌های هیدروکسید در محیط‌های قلیایی منجر به افزایش جذب سطحی مولکول‌های رنگزا بر روی سطح  $\text{SnIn}_4\text{S}_8$  می‌شود و بدین ترتیب با افزایش فرصت حمله گونه‌های فعال به مولکول‌های رنگزا راندمان حذف افزایش می‌یابد. این نتایج در توافق خوبی با یافته‌های تحقیقات دیگر است (۱۹-۱۸). همچنین از شکل (۲-ب) ملاحظه می‌شود هنگامی که محلول سوسپانسیون رنگزا و پودر  $\text{SnIn}_4\text{S}_8$  در مدت زمان‌های طولانی‌تر در معرض تابش مرئی قرار می‌گیرند، راندمان حذف افزایش می‌یابد. در حقیقت با افزایش مدت زمان تابش‌دهی، قدرت نفوذ فوتون‌های نور مرئی افزایش یافته در نتیجه تولید گونه‌های فعال افزایش می‌یابد (۲۰).

بهینه‌سازی فرآیند حذف فوتوکاتالیزوری RhB با  $\text{SnIn}_4\text{S}_8$  تحت تابش نور مرئی نشان داد که حدود ۸۱/۱۵٪ از رنگزا تحت شرایط بهینه ( $4 \text{ mg L}^{-1}$  غلظت اولیه RhB،  $1/25 \text{ g L}^{-1}$  کاتالیزور،  $\text{pH}=9$  و مدت زمان تابش‌دهی ۱۱۵ دقیقه) حذف می‌شود.

بعدی (سطح پاسخ) ناشی از اثرات متقابل متغیرهای عملیاتی بررسی شد.



شکل (۲): سطوح پاسخ تأثیر متغیرهای عملیاتی مؤثر بر حذف فوتوکاتالیزوری RhB

مطابق شکل (۲-الف) راندمان حذف رنگزا با افزایش غلظت اولیه رنگزا کاهش یافته است. چندین دلیل قانع‌کننده برای این پدیده می‌توان بیان کرد. اولاً افزایش غلظت اولیه رنگزا منجر به تشدید پراکندگی نور و کدورت محلول می‌شود و بنابراین نفوذ نور مرئی به درون محلول و به تبع آن جذب فوتون‌ها به وسیله سطح کاتالیزور کاهش می‌یابد. ثانیاً در غلظت بالای رنگزا تشکیل گونه‌های اکسیدکننده به دلیل پوشیده شدن سطح فعال کاتالیزور با مولکول‌های رنگزا کاهش می‌یابد. ثالثاً حضور تعداد محدودی از گونه‌های اکسیدکننده نظیر رادیکال‌های هیدروکسیل نمی‌تواند پاسخگوی تعداد زیادی از مولکول‌های رنگزا باشد (۱۶-۱۵). همچنین مطابق شکل (۲-ب) راندمان حذف رنگزا با افزایش مقدار کاتالیزور افزایش یافته است. در واقع افزایش مقدار کاتالیزور موجب افزایش تعداد جایگاه‌های فعال موجود و به تبع آن افزایش تعداد مولکول‌های رنگزای جذب سطحی شده می‌شود. به همین ترتیب با افزایش



### نتیجه‌گیری

در این تحقیق، فعالیت فوتوکاتالیزوری قلع ایندیوم سولفید ( $\text{SnIn}_4\text{S}_8$ ) در حذف رنگزای رودامین ب ( $\text{RhB}$ ) تحت تابش نور مرئی مورد ارزیابی قرار گرفت. تأثیر پارامترهای عملیاتی، نظیر غلظت اولیه  $\text{RhB}$ ، مقدار کاتالیزور،  $\text{pH}$  محلول و مدت زمان تابش دهی با طراحی آزمایش به روش RSM در ارزیابی عملکرد فوتوکاتالیزوری  $\text{SnIn}_4\text{S}_8$  مورد بررسی قرار گرفت و فرآیند بهینه‌سازی توسط طراحی ترکیب مرکزی نشان داد که تحت شرایط بهینه ( $4 \text{ mg L}^{-1}$  غلظت اولیه  $\text{RhB}$ ،  $1/25 \text{ g L}^{-1}$  از  $\text{SnIn}_4\text{S}_8$ ،  $\text{pH} = 9$  و مدت زمان تابش دهی ۱۱۵ دقیقه) بیش از ۸۱٪ از رنگزا حذف شد. این نتیجه تئوری از راه آزمایش تجربی با راندمان حذف ۷۸/۹۶٪ به اثبات رسید که تأکید بر دقت و صحت مدل ارائه شده است. مطالعات سینتیکی بر پایه رابطه لانگمویر - هینشل‌وود صورت پذیرفت و بر اساس نتایج مشخص شد که فرآیند مذکور از مدل سینتیکی شبه درجه اول با مقدار ثابت ظاهری  $0/047 \text{ min}^{-1}$  پیروی می‌کند.

### تعارض منافع

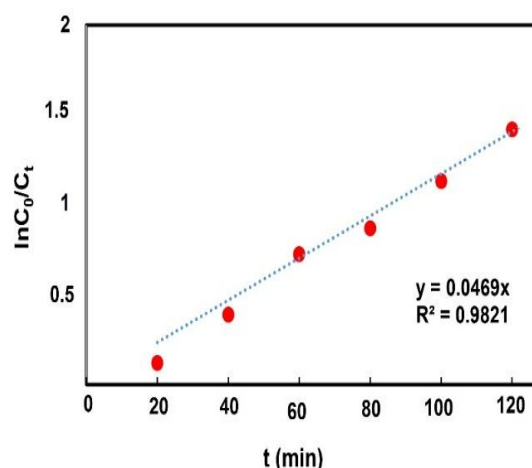
نویسنده هیچگونه تعارض منافی برای اعلام ندارد.

### منابع

- [1] Sharma, V.K., Feng, M., 2019, Water depollution using metal-organic frameworks-catalyzed advanced oxidation processes: A review, *Journal of Hazardous Materials*, 372, 3.
- [2] Aksu, Z., 2005, Application of biosorption for the removal of organic pollutants: A review, *Process Biochemistry*, 40, 997.
- [3] Forgacs, E., Cserháti, T., Oros, G., 2004, Removal of synthetic dyes from wastewaters: A review, *Environment International*, 30, 953.

انجام آزمایش‌های تجربی تحت شرایط بهینه نیز نشان داد که راندمان حذف بیش از ۷۸٪ می‌باشد که نزدیکی مقادیر تجربی و تئوری راندمان حذف، تأکیدی دوباره بر دقت و صحت مدل ارائه شده می‌باشد.

مدل سینتیکی لانگمویر - هینشل‌وود<sup>۶</sup> از جمله مدل‌های سینتیکی متداول در بررسی سینتیک سیستم‌های ناهمگن نظیر فرآیندهای فوتوکاتالیزوری است. در این تحقیق نیز از این مدل برای مطالعه سینتیک حذف  $\text{RhB}$  توسط فرآیند فوتوکاتالیزوری استفاده شد. برای این منظور، آزمایش‌ها در شرایط بهینه پیشنهاد شده RSM در محدوده زمانی ۱۲۰ دقیقه انجام شد. از رسم نمودار  $\ln C_0/C_t$  برحسب تغییرات زمان (شکل ۳)، ضریب همبستگی ( $R^2$ ) برابر ۰/۹۸۲ حاصل شد که حاکی از پیروی فرآیند مورد مطالعه از مدل سینتیکی شبه مرتبه اول لانگمویر - هینشل‌وود با ثابت سرعت  $0/047 \text{ min}^{-1}$  است.



شکل (۳): نمودار سینتیک حذف فوتوکاتالیزوری  $\text{RhB}$  توسط  $\text{SnIn}_4\text{S}_8$  تحت تابش نور مرئی

<sup>۶</sup> Langmuir-Hinshelwood

- dimensional  $\text{SnIn}_4\text{S}_8$ -CdS core-shell heterostructure as a direct Z-scheme photocatalyst with enhanced photocatalytic oxidation and reduction capabilities, *Applied Surface Science*, 542, 148618.
- [14] Asoubar, S., Mehrizad, A., Behnajady, M.A., Ramazani, M.E., Gharbani, P., 2023, Hexavalent chromium reduction and Rhodamine B degradation by visible-light-driven photocatalyst of stannum indium sulfide-samarium vanadate, *npj Clean Water*, 27.
- [15] Rajabi, H.R., Khani, O., Shamsipur, M., Vatanpour, V., 2013, High-performance pure and  $\text{Fe}^{3+}$ -ion doped ZnS quantum dots as green nanophotocatalysts for the removal of malachite green under UV-light irradiation, *Journal of Hazardous Materials*, 250, 370.
- [16] Rajabi, H.R., Farsi, M., 2015, Effect of transition metal ion doping on the photocatalytic activity of ZnS quantum dots: Synthesis, characterization, and application for dye decolorization, *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, 399, 53.
- [17] Zhao, X., Su, S., Wu, G., Li, C., Qin, Z., Lou, X., Zhou, J., 2017, Facile synthesis of the flower-like ternary heterostructure of Ag/ZnO encapsulating carbon spheres with enhanced photocatalytic performance, *Applied Surface Science*, 406, 254.
- [18] Allahveran, S., Mehrizad, A., 2017, Polyaniline/ZnS nanocomposite as a novel photocatalyst for removal of Rhodamine 6G from aqueous media: Optimization of influential parameters by response surface methodology and kinetic modeling, *Journal of Molecular Liquids*, 225, 339.
- [19] Mehrizad, A., Gharbani, P., 2017, Novel ZnS/carbon nanofiber photocatalyst for degradation of Rhodamine 6G: Kinetics tracking of operational parameters and development of a kinetics model, *Photochemistry and Photobiology*, 93, 1178.
- [20] Ran, R., Meng, X., Zhang, Z., 2016, Facile preparation of novel graphene oxide-modified  $\text{Ag}_2\text{O}/\text{Ag}_3\text{VO}_4/\text{AgVO}_3$  composites with high photocatalytic activities under visible light irradiation, *Applied Catalysis B: Environmental*, 196, 1.
- [4] Lim, L.B.L., Priyantha, N., Fang, X.Y., Zaidi, N.M., 2017, *Artocarpus odoratissimus* peel as a potential adsorbent in environmental remediation to remove toxic Rhodamine B dye, *Journal of Materials and Environmental Science*, 8, 494.
- [5] Zheng, H., Chen, Y., Sun, X., Zheng, X., Zhang, X., Guan, X., 2024, Enhanced photocatalytic performance and mechanism of N-deficiently porous g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> in organic pollutant degradation, *Materials Research Bulletin*, 169, 112510.
- [6] Adeyemo, A.A., Adeoye, I.O., Bello, O.S., 2017, Adsorption of dyes using different types of clay: A review. *Applied Water Science*, 7, 543.
- [7] Kasperchik, V.P., Yaskевич, A.L., Bil'Dyukevich, A.V., 2012, Wastewater treatment for removal of dyes by coagulation and membrane processes, *Petroleum Chemistry*, 52, 545.
- [8] Kumar, A.N., Reddy, C.N., Mohan, S.V., 2015, Biomineralization of azo dye bearing wastewater in periodic discontinuous batch reactor: Effect of microaerophilic conditions on treatment efficiency, *Bioresource Technology*, 188, 56.
- [9] Khan, M.A., Ahmad, A., Umar, K., Nabi, S.A., 2015, Synthesis, characterization, and biological applications of nanocomposites for the removal of heavy metals and dyes, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 54, 76.
- [10] Zhang, G., Wu, H., Chen, D., Li, N., Xu, Q., Li, H., He, J., Lu, J., 2022, A mini-review on  $\text{ZnIn}_2\text{S}_4$ -based photocatalysts for energy and environmental application, *Green Energy & Environment*, 7, 176.
- [11] Lei, Z., You, W., Liu, M., Zhou, G., Takata, T., Hara, M., Domen, K., Li, C., 2003, Photocatalytic water reduction under visible light on a novel  $\text{ZnIn}_2\text{S}_4$  catalyst synthesized by hydrothermal method, *Chemical Communications*, 17, 2142.
- [12] Xu, P., Huang, S., Lv, Y., Chen, Y., Liu, M., Fan, H., 2018, Surfactant-assisted hydrothermal synthesis of rGO/ $\text{SnIn}_4\text{S}_8$  nanosheets and their application in complete removal of Cr (VI), *RSC Advances*, 8, 5749.
- [13] Zhang, S., Zhang, B., Jiang, Y., Xiao, Y., Zhang, W., Xu, H., Yang, X., Liu, Z., Zhang, J., 2021, In-situ constructing of one-

“Research article”

## Photocatalytic removal of Rhodamine B dye by SnIn<sub>4</sub>S<sub>8</sub>: Optimization of Process by Response Surface Methodology

### Photocatalytic removal of Rhodamine B by SnIn<sub>4</sub>S<sub>8</sub>

Ali Mehrizad<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Chemistry, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

<sup>2</sup>Industrial Nanotechnology Research Center, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

\*Corresponding author: mehrizad@iaut.ac.ir

(Received: 24 May 2024, Accepted: 8 June 2024)

#### Abstract

In this study, the performance of stannum indium sulfide (SnIn<sub>4</sub>S<sub>8</sub>) was evaluated for photocatalytic degradation of Rhodamine B dye (RhB) as an environmental pollutant. Response surface methodology (RSM) was utilized to optimize the effective operating variables (initial RhB concentration, SnIn<sub>4</sub>S<sub>8</sub> amount, solution pH, and irradiation time). Maximum removal efficiency of 81.15% was achieved under optimum conditions. This predicted result was confirmed experimentally (78.96%). The kinetics study of photocatalytic RhB removal by SnIn<sub>4</sub>S<sub>8</sub> showed adherence to the pseudo-first-order kinetic model with a rate constant of 0.047 min<sup>-1</sup>. The outstanding performance of SnIn<sub>4</sub>S<sub>8</sub> originated from its flowerlike hierarchical structure, which enhances light photon absorption, and increases pollutant adsorption.

**Conflict of interest:** None declared.

**Keywords:** Stannum indium sulfide, Rhodamine B, Photocatalytic process, Response surface methodology, Kinetics





دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز  
فصلنامه آلودگی‌های محیطی و توسعه پایدار شهری

دوره اول، شماره ۱، پیاپی ۱  
بهار ۱۴۰۳، صفحات ۶۸-۵۳

## "مقاله پژوهشی"

# ارتباط مکانی عوامل اقلیمی و آلودگی هوا در ۱۰ سال گذشته شهر تبریز

## ارتباط مکانی عوامل اقلیمی و آلودگی هوا

### فهیمة بناصالح

دانش آموخته گروه آموزشی محیط زیست، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

### محمد ابراهیم رضانی\*

دانشیار گروه مهندسی محیط زیست، مرکز تحقیقات مدیریت توسعه پایدار حوضه آبریز دریاچه ارومیه و رودخانه ارس، واحد تبریز، دانشگاه آزاد

اسلامی، تبریز، ایران

### زیبا بهشتی

پژوهشگر مرکز تحقیقات مدیریت توسعه پایدار حوضه آبریز دریاچه ارومیه و رودخانه ارس، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: ramazani@iaut.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۱۱/۰۵، پذیرش نهایی: ۱۴۰۲/۱۱/۲۸)

## چکیده

آلودگی هوا خطری بزرگ برای بسیاری از شهرهای ایران به ویژه کلان شهر تبریز به شمار می‌آید. رشد شتاب آلود جمعیت، مهاجرت‌های روستایی، گسترش کارخانه‌ها، تراکم وسایل نقلیه، تبریز را به یکی از آلوده‌ترین شهرهای کشور ایران تبدیل کرده است. گذشته از عوامل انسانی، عوامل جغرافیایی نظیر موقعیت مکانی، شرایط توپوگرافی، عوامل طبیعی و وارونگی دمایی هم در شدت آلودگی هوای شهر تبریز مؤثر هستند. لذا در این پژوهش با استفاده از روش‌های تحقیقی توصیفی و با استناد به منابع و داده‌های هواشناسی و آلودگی هوا، رابطه مکانی عوامل اقلیمی بر روی آلودگی هوای شهر تبریز مورد بررسی قرار گرفت. با اخذ اطلاعات از ایستگاه‌های هواشناسی مرتبط با شهر تبریز و نیز داده‌های مربوط به کیفیت هوای تبریز در ایستگاه‌های سنجش کیفیت هوا و با استفاده از نرم‌افزار سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) نقشه‌های یکپارچه تهیه گردید که فاصله‌ها و پهنه‌بندی آلودگی‌ها در آن قابل نمایش می‌باشد. با توجه به نتایج حاصل از پژوهش بین پارامترهای هواشناسی و پارامترهای آلودگی هوا رابطه مکانی و نیز هم‌بستگی معناداری وجود دارد. همچنین پراکنش پارامترهای آلودگی هوا در سطح شهر تبریز نشان می‌دهد که بیش‌ترین آلودگی در منطقه غربی و مرکز شهر ناشی از گازهای آلاینده  $CO$ ،  $O_3$ ،  $NO_2$ ،  $SO_2$  بوده و در منطقه شرقی شهر تبریز این آلودگی مربوط به ذرات معلق می‌باشد. همچنین شاخص کیفیت هوا در فصول مختلف سال نشان داد، فصل تابستان و بهار کم‌ترین آلودگی هوا و فصل پاییز و زمستان بیش‌ترین آلودگی هوا را دارد.

واژه‌های کلیدی: رابطه مکانی، عوامل اقلیمی، آلودگی هوا، هم‌بستگی معنادار، تبریز

## مقدمه

شهرنشینی یکی از راه‌های مهم تحولات اقتصادی و اجتماعی قرن بیستم به ویژه در کشورهای در حال توسعه بوده است (۱). افزایش جمعیت و رشد فرآیندها و شهرها و مناطق مسکونی و صنعتی، اراضی کشاورزی و پوشش طبیعی زیادی را به کام خود فرو می‌برد. این مسئله موجب بروز مشکلاتی در زمینه نیازهای آینده بشر می‌شود (۲) و از طرفی شهرها در خط مقدم انتقال انرژی جهانی قرار دارند. تا سال ۲۰۱۸، بیش از نیمی از جمعیت جهان یعنی ۴/۴ میلیارد نفر در شهرها زندگی می‌کردند، در حالی که این رقم در سال ۲۰۰۰ بیش از ۲/۹ میلیارد نفر بوده است. شهرها دو سوم تقاضای جهانی انرژی را دارند و همچنین محرک‌های مهمی در اقتصاد جهانی هستند. تعداد فرآیندهای از شهرها از جمله لندن، توکیو و نیویورک دارای بزرگ‌ترین اقتصادها در جهان می‌باشند در حالیکه موجب انتشار ۷۵ درصد از دی اکسیدکربن جهان نیز هستند و نقش موثری در تغییرات اقلیمی دارند (۳). با توجه به رشد روزافزون جمعیت و تمرکز آن از نظر مکانی و همچنین استفاده از استانداردهای بالای زندگی، امروزه آلودگی هوا و محیط زیست به عنوان یکی از معضلات جامعه بشری مطرح گردیده و این مسئله منطقه‌ای نبوده و به مرزهای سیاسی و اجتماعی محدود نیست؛ بلکه یک مسئله جهانی است. بر اساس گزارش

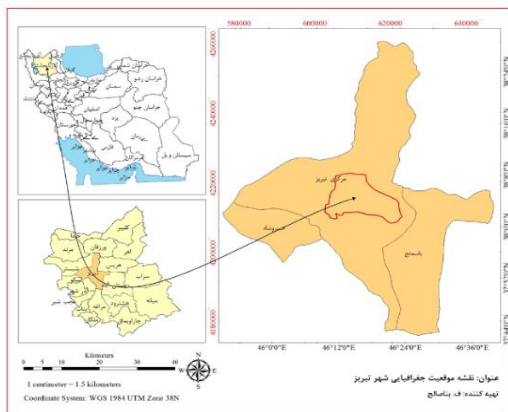
<sup>۱</sup> IPCC برخی پارامترهای هواشناسی نیز به دلیل

تغییراتی که در ترکیب جو ایجاد شده است، در آینده نیز تغییر خواهند کرد. بیش‌ترین حجم آلودگی هوا، توسط احتراق سوخت‌های فسیلی در جو رها می‌شود و با افزایش جمعیت و روند رو به رشد مصرف سوخت‌های فسیلی، انتظار افزایش آلودگی را داریم (۴). گرم شدن جهانی هوا ناشی از گازهای گلخانه‌ای پیامدهایی دارد که از جمله مهم‌ترین آن‌ها تغییرات اقلیمی و خطرات ناشی از این تغییرات است (۵ و ۶). این تغییرات می‌توانند از طریق فرآیندهای طبیعی مانند خروج ذرات آتش‌فشان‌ها یا گردبادهای صحرائی و یا از طریق فرآیندهای مصنوعی ناشی از کاربردهای مختلف صنعتی و حمل و نقل ایجاد شوند (۷). شرایط بحرانی آلودگی هوا تحت شرایط جوی خاصی ایجاد و تشدید می‌شود (۸). در تشکیل و تراکم این آلاینده‌ها عوامل و عناصر آب و هوایی، مانند تابش خورشید، دما، رطوبت نسبی، پایداری هوا، شدت و فراوانی وارونگی‌های دمایی و جهت سرعت باد تاثیر دارند (۹).

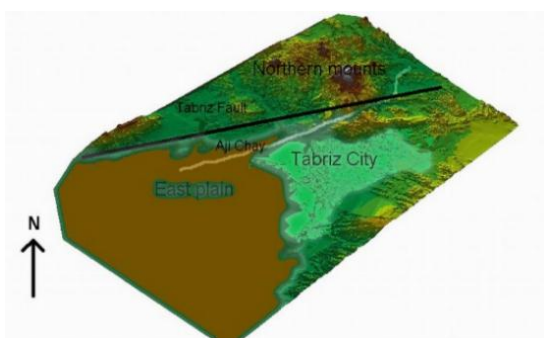
نقش آب و هوا در کاهش یا افزایش آلودگی هوا و دیگر پدیده‌های شهری در کلان شهرها بخصوص در شهر تبریز انکارناپذیر است (۱۰). آرایش سامانه‌های جوی و ویژگی‌های دینامیکی و ترمودینامیکی حاکم بر منطقه نیز می‌تواند وضعیت جوی روزانه را کنترل کند (۱۱ و ۱۲). کوچک‌ترین تغییرات در اقلیم، اکوسیستم را تحت تاثیر قرار می‌دهد (۱۳ و ۱۴). به منظور کاهش و تعدیل آلودگی هوا در شهر تبریز و متقابلاً اثرات و مشکلات ناشی از آن، بررسی روابط مکانی بین عوامل اقلیمی و آلودگی هوای شهر تبریز ضرورت دارد. بررسی‌های انجام گرفته نشان می‌دهد که تاکنون مطالعه و پژوهش کاملی برای تعیین ارتباط

<sup>۱</sup> هیئت بین دولتی تغییر اقلیم است که در زمینه ارزیابی علوم مربوط به تغییر اقلیم فعالیت دارد و ایران نیز یکی از ۱۹۵ عضو این هیئت می‌باشد.

شکل‌های (۱) و (۲) ارائه گردیده، ایجاد شده است. این شهر دارای مراکز صنعتی مانند نیروگاه‌ها، پالایشگاه‌ها، مجتمع پتروشیمی، کوره‌های آجرپزی و ماشین‌سازی می‌باشد. آب و هوای تبریز نیز خشک با تابستان‌های گرم و خشک و زمستان‌های سرد است. توپوگرافی خاص تبریز و نحوه قرارگیری کوه‌ها از عواملی هستند که سبب افزایش آلودگی هوا در این شهر می‌شوند. به طوری که در فصول سرد سال از عوامل اصلی در ایجاد وارونگی دمایی به شمار می‌آیند.



شکل (۱): نقشه موقعیت جغرافیایی شهر تبریز



شکل (۲): موقعیت طبیعی شهر تبریز (۱۶)

#### - روش کار

پژوهش حاضر به صورت تحقیقی-توصیفی با اخذ اطلاعات از ایستگاه‌های هواشناسی مرتبط با شهر

بین آلودگی هوا و عوامل اقلیمی در سال‌های اخیر نسبت به اهداف بررسی در این پژوهش، انجام نگرفته است. در این تحقیق به بررسی ارتباط چهار عامل اقلیمی اعم از بارش، جهت باد، دما، تابش خورشید و تغییرات اقلیمی انسانی با کیفیت هوای شهر تبریز طی ۱۰ سال گذشته پرداخته شده است. موضوع اثر تغییرات اقلیمی بر آلودگی کلان شهرها جزو مسائلی است که کم‌تر به آن پرداخته شده و پژوهش‌های صورت گرفته بیش‌تر به تاثیر آلودگی بر تغییرات اقلیم تاکید کرده‌اند. بنابراین، تحقیق در زمینه تاثیرات اقلیمی بر آلودگی هوای شهر تبریز بسیار حائز اهمیت بوده و بررسی در این زمینه می‌تواند به عنوان یک راه‌حل مهم جهت کاهش اثرات منفی ناشی از این بحران باشد. نتایج تحقیق حاضر به عنوان گام اساسی برای کارشناسان و محققان کشور در مدیریت کیفیت هوا و شناسایی مناطق بحرانی و آلاینده هوا خواهد بود، که می‌تواند برای تصمیم‌گیری و مدیریت آلودگی هوا و همچنین در تهیه طرح‌های تفصیلی به کار گرفته شود.

#### روش تحقیق

##### - موقعیت جغرافیایی منطقه

شهر تبریز با جمعیتی حدود یک میلیون و پانصد هزار نفر در مختصات جغرافیایی  $38^{\circ}17'$  عرض شمالی و  $46^{\circ}17'$  طول شرقی و  $38^{\circ}14'$  عرض شمالی واقع شده است (۱۵). این شهر از شمال به کوه‌های پکه چین و عون بن علی، از شمال شرق به کوه‌های گوزنی و بابا باغی، از سمت شرق به کوه‌های ساری داغ و بیلان کوه، از سمت جنوب به دامنه کوه سهند و از سمت غرب به دشت تبریز (کمر بند صنایع) محدود شده است و به شکل یک گودال یا یک جلگه بین کوهی که در

معادله (۱): درونیابی ارزش یک پارامتر مجهول

$$z_o = \frac{\sum_{i=1}^N z_i d_i^{-n}}{\sum_{i=1}^N d_i^{-n}}$$

#### - ویژگی‌های توپوگرافی منطقه مورد مطالعه

تمام فعالیت‌های بشری، به‌طور مستقیم و یا غیرمستقیم وابسته به محیط طبیعی است و ویژگی‌های زمین نیز به عنوان مهم‌ترین عنصر محیطی در استقرار فعالیت‌های بشری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. همچنین شکل و سیمای آن (پستی و بلندی، ناهمواری و عوارض) نیز محدودیت‌ها و قابلیت‌های ویژه‌ای را در استقرار فعالیت‌های انسانی فراهم می‌کند که در صورت شناخت دقیق آن‌ها می‌توان به صورت پایدار از این عنصر اصلی محیطی بهره گرفت. با توجه به اینکه استان آذربایجان شرقی در یک منطقه کوهستانی قرار گرفته است، با توجه به جدول (۱) و شکل (۳)، به طور طبیعی اختلاف ارتفاع یکی از ویژگی‌های بارز این منطقه است. معمولا ارتفاع زیاد، نقش محدود کننده‌ای در استقرار فعالیت‌های انسانی و توسعه آن‌ها ایفا می‌کند.

جدول (۱): جدول توزیع درصد طبقات ارتفاعی در سطح شهر

تبریز

ردیف	طبقات ارتفاعی	مساحت (ha)	درصد	درصد تجمعی
۱	۱۳۴۰-۱۳۵۰	۸۷۲/۷۰	۵/۱۱	۵/۱۱
۲	۱۳۵۰-۱۴۰۰	۷۹۵۳/۷۴	۴۶/۰۲	۵۱/۱۴
۳	۱۴۰۰-۱۴۵۰	۲۵۰۹/۷	۱۴/۷۰	۶۵/۸۴
۴	۱۴۵۰-۱۵۰۰	۲۲۶۷/۸۲	۱۳/۲۹	۷۹/۱۳
۵	۱۵۰۰-۱۵۵۰	۱۵۲۳/۹۵	۸/۹۳	۸۸/۰۶
۶	۱۵۵۰-۱۶۰۰	۱۳۱۴/۸۲	۷/۷۰	۹۵/۷۶
۷	۱۶۰۰-۱۶۵۰	۶۱۶/۷۳	۳/۶۱	۹۹/۳۸
۸	۱۶۰۰-۱۷۲۴	۱۰۶/۵۲	۰/۶۲	۱۰۰

تبریز و نیز داده‌های مربوط به کیفیت هوای تبریز از ایستگاه‌های سنجش کیفیت هوای تبریز شروع و با استفاده از نرم افزار GIS نقشه‌های یکپارچه تهیه گردید. همچنین از امکانات GIS جهت آنالیزهای مختلف بر اساس ویژگی‌های مکانی استفاده شد. روش‌های مطالعاتی پژوهش حاضر به دو دسته تقسیم می‌شود که عبارت است از: روش‌های آماری و روش‌های سنجش از راه دور. برای دستیابی به هدف پژوهش پس از مشخص کردن منبع داده‌ها و دوره زمانی تحقیق و موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌ها، تغییرات غلظت نسبی روزانه، ماهانه و سالانه آلاینده‌ها اخذ شده و در ادامه همبستگی بین مشخصه‌های مختلف هواشناسی و آلودگی هوا بررسی گردید.

#### - جامعه آماری، روش نمونه‌گیری و حجم نمونه

نمونه‌گیری با استفاده از نتایج ایستگاه‌های سنجش هوا و داده‌های اخذ شده از داده‌های اداره کل هواشناسی و اداره کل حفاظت محیط زیست آذربایجان شرقی در محدوده شهر تبریز جهت بررسی تأثیر عوامل اقلیمی در آلودگی هوا استفاده شد. از متد درونیابی (IDW<sup>۲</sup>) جهت برآورد پارامترهایی که محدودیتی در نمونه‌برداری آن‌ها وجود داشت استفاده گردید.

#### - تکنیک درونیابی (IDW)

در ابتدا محدوده مورد نظر تبدیل به ماتریسی با سلول‌های هم‌اندازه می‌شود. مختصات مکانی ماتریس و اندازه هر پیکسل آن با توجه به معادله (۱)، روشن بوده و دارای واحد اندازه‌گیری است.

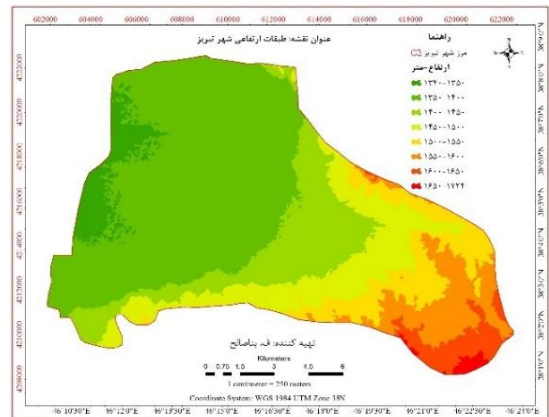
<sup>2</sup> Inverse Distance Weighting



بیشترین مساحت جهت شیب محدوده مورد مطالعه با توجه به جداول (۲) و (۳) و شکل (۴) مربوط به طبقه ۹ (جهت شمال غرب) می باشد و حداقل سطح جهت شیب مربوط به طبقه ۵ می باشد (شکل ۵).

جدول (۳): جدول توزیع درصد جهت شیب در شهر تبریز

ردیف	جهت شیب	مساحت (ha)	درصد	درصد تجمعی
۱	بدون جهت	۱۴۲۴/۴۰	۸/۳۵	۸/۳۵
۲	شمال	۱۰۰۴/۶۶	۵/۸۹	۱۴/۲۳
۳	شمال شرق	۱۷۹۹/۳۵	۱۰/۵۴	۲۴/۷۸
۴	شرق	۹۰۲/۲۸	۵/۲۹	۳۰/۰۷
۵	جنوب شرق	۹۲۵/۴۴	۵/۴۲	۳۵/۴۹
۶	جنوب	۱۷۳۹/۳۴	۱۰/۱۹	۴۵/۶۸
۷	جنوب غرب	۲۴۱۵/۱۲	۱۴/۱۵	۵۹/۸۳
۸	غرب	۲۸۹۳/۸۰	۱۶/۹۶	۷۶/۷۹
۹	شمال غرب	۳۹۶۰/۴۲	۲۳/۲۱	۱۰۰

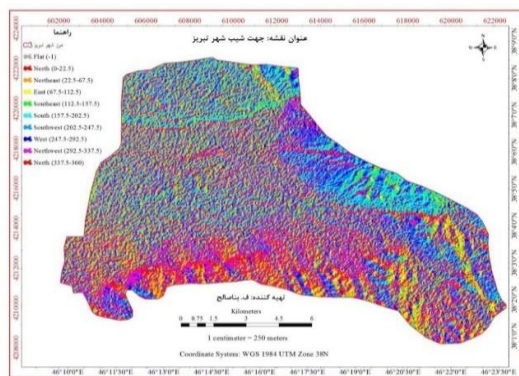


شکل (۳): نقشه طبقات ارتفاعی شهر تبریز

از دید و منظر کلی، استان آذربایجان شرقی در یک منطقه کوهستانی واقع شده است و از خصوصیات بارز اینگونه مناطق وجود دامنه هایی با شیب زیاد است. شیب زیاد زمین از عوامل محدود کننده در استقرار و توسعه فعالیت های انسانی محسوب می شود.

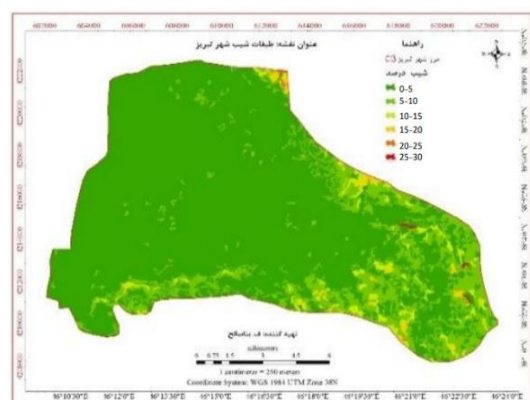
جدول (۲): جدول توزیع درصد شیب شهر تبریز

ردیف	طبقات شیب	مساحت (ha)	درصد	درصد تجمعی
۱	۰-۵	۱۳۴۷۷/۷۹	۷۸/۹۸	۷۸/۹۸
۲	۵-۱۰	۲۹۵۸/۹۰	۱۷/۳۴	۹۶/۳۲
۳	۱۰-۱۵	۴۸۲/۶۱	۲/۸۳	۱۵/۹۹
۴	۱۵-۲۰	۱۱۸/۳۵	۰/۶۹	۹۹/۸۴
۵	۲۰-۲۵	۱۱/۳۲	۰/۰۷	۹۹/۹۱
۶	۲۵-۳۰	۱۵/۲۵	۰/۰۹	۱۰۰



شکل (۵): نقشه جهت شیب شهر تبریز

اقلیم تبریز استپی خشک با تابستان های گرم و خشک و زمستان های سرد است. سرمای زمستانی، تأثیر گرفته از ارتفاع بالا و توپوگرافی کوهستانی منطقه است. در مطالعه حاضر اطلاعات اقلیمی و آب و هواشناسی از ۴ ایستگاه سینوپتیک منتخب در استان آذربایجان شرقی استخراج گردیده است.



شکل (۴): نقشه طبقات شیب شهر تبریز

میانگین بارندگی سالیانه تبریز مانند بیش‌تر شهرهای ایران بسیار اندک و در حدود ۳۳۰/۱ میلی‌متر در سال است که در جدول (۴) ارائه گردیده است. بارندگی‌های استان عموماً به صورت باران ریزش نموده ولی بخش قابل توجهی از آن در فصل زمستان به صورت برف است. منظم بودن بارندگی‌های استان را می‌توان ویژگی برجسته ریزش‌های جوی آن دانست (شکل ۶).

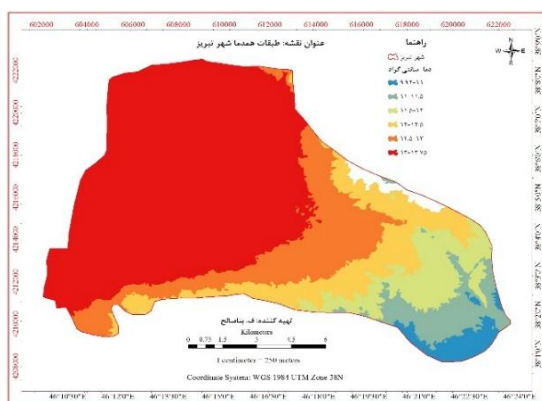
جدول (۴): جدول ویژگی‌های بارندگی شهر تبریز

ردیف	طبقات همباران	مساحت (m <sup>2</sup> )	درصد	درصد	درصد
۱	۲۲۶-۲۴۰	۵۸۰۹۸۵۶۸/۹۵	۳۴/۰۴	۳۴/۰۴	۳۴/۰۴
۲	۲۴۰-۲۵۵	۳۵۹۰۰۱۸۸/۹۵	۲۱/۰۴	۲۱/۰۴	۵۵/۰۸
۳	۲۵۵-۲۷۰	۱۸۳۵۳۸۲۶/۷۸	۱۰/۷۶	۱۰/۷۶	۶۵/۸۴
۴	۲۷۰-۲۸۵	۱۸۰۸۰۶۲۹/۵۲	۱۰/۵۹	۱۰/۵۹	۷۶/۴۳
۵	۲۸۵-۳۰۰	۱۲۲۳۷۴۸۶/۷۳	۷/۱۷	۷/۱۷	۸۳/۶۰
۶	۳۰۰-۳۱۵	۱۲۴۰۵۵۹۷/۶۹	۷/۲۷	۷/۲۷	۹۰/۸۷
۷	۳۱۵-۳۳۰	۸۳۴۳۶۶۱/۳۸۵	۴/۸۹	۴/۸۹	۹۵/۷۶
۸	۳۳۰-۳۴۵	۵۲۵۹۱۹۸/۳۵۱	۳/۰۸	۳/۰۸	۹۸/۸۴
۹	۳۴۵-۳۶۰	۱۶۷۵۵۸۴/۳۱۴	۰/۹۸	۰/۹۸	۹۹/۸۳
۱۰	۳۶۰-۳۷۹/۷	۲۹۸۴۵۹/۰۴۴۹	۰/۱۷	۰/۱۷	۱۰۰

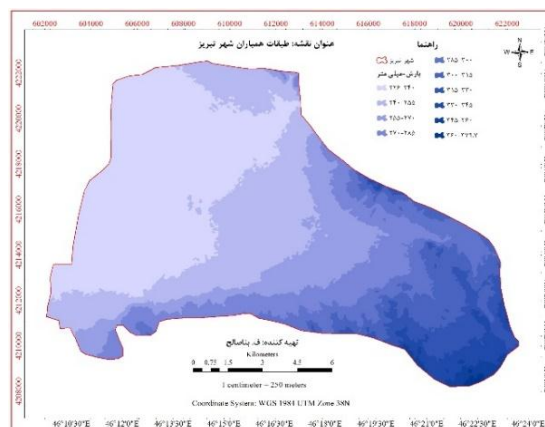
باتوجه به شرایط توپوگرافی و موقعیت آن نسبت به جریان‌ات هوایی و همچنین عرض جغرافیایی، تغییرات سالانه متوسط دما در ۴ ایستگاه منتخب سینوپتیک استان آذربایجان شرقی (اطراف شهر تبریز) نشان داده شده است (جدول ۵). با نگاهی اجمالی به شکل (۷) مشخص می‌شود که میانگین دمای هوا در شهر تبریز ۱۳/۵ سانتی‌گراد است. در شهر تبریز عموماً مرداد ماه گرم‌ترین ماه و بهمن ماه سردترین ماه سال است.

جدول (۵): جدول ویژگی‌های دمایی شهر تبریز

ردیف	طبقات هم‌دما	مساحت (ha)	درصد	درصد	درصد
۱	۹,۹۳-۱۱	۴۶۷/۱۰	۲/۷۴	۲/۷۴	۲/۷۴
۲	۱۱-۱۱/۵	۹۹۷/۷۶	۵/۸۵	۵/۸۵	۸/۵۸
۳	۱۱,۵-۱۲	۱۶۲۵/۷۶	۹/۵۳	۹/۵۳	۱۸/۱۱
۴	۱۲-۱۲/۵	۱۹۷۳/۳۴	۱۱/۵۶	۱۱/۵۶	۲۹/۶۷
۵	۱۲,۵-۱۳	۲۴۹۲/۷۰	۱۴/۶۱	۱۴/۶۱	۴۴/۲۸
۶	۱۳-۱۳/۷۵	۹۵۰۸/۹۵	۵۵/۷۲	۵۵/۷۲	۱۰۰



شکل (۷): نقشه هم دما شهر تبریز



شکل (۶): نقشه همباران شهر تبریز

با توجه به جدول (۶) و شکل (۸)، تغییرات تعداد روزهای یخبندان در ۴ ایستگاه سینوپتیک منتخب مشخص می‌شود که میانگین تعداد روزهای یخبندان

## فصلنامه آلودگی‌های محیطی و توسعه پایدار شهری

دوره اول، شماره ۱، پیاپی ۱، بهار ۱۴۰۳، صفحات ۶۸-۵۳

با توجه به مورفولوژی بخش‌های مختلف استان تحت تأثیر فاکتورهای مختلف اقلیمی متفاوت بوده و مقدار آن در شهر تبریز تقریباً ۸۵ روز است.

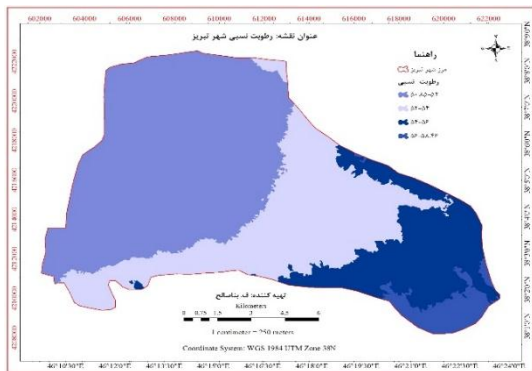
جدول (۶): جدول ویژگی‌های روزهای یخبندان استان آذربایجان شرقی

ردیف	طبقات روزهای یخبندان	مساحت (ha)	درصد	درصد	تجمعی
۱	۸۴-۹۰	۸۷۲۶/۴۵	۵۱/۱۴	۵۱/۱۴	۵۱/۱۴
۲	۹۰-۹۵	۲۵۰۹/۰۷	۱۴/۷۰	۶۵/۸۴	۶۵/۸۴
۳	۹۵-۱۰۰	۲۲۶۷/۸۲	۱۳/۲۹	۷۹/۱۳	۷۹/۱۳
۴	۱۰۰-۱۰۵	۱۵۲۳/۹۵	۸/۹۳	۸۸/۰۶	۸۸/۰۶
۵	۱۰۵-۱۱۰	۱۳۱۴/۸۲	۷/۷۰	۹۵/۷۶	۹۵/۷۶
۶	۱۱۰-۱۱۵	۶۱۶/۷۳	۳/۶۱	۹۹/۳۸	۹۹/۳۸
۷	۱۱۵-۱۲۳	۱۰۶/۵۲	۰/۶۲	۱۰۰	۱۰۰

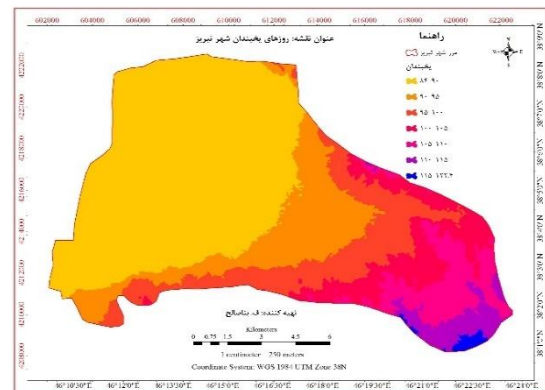
برخوردار است. با توجه به شکل (۹)، میانگین رطوبت نسبی هوا در شهر تبریز ۵۱/۶ درصد می‌باشد (جدول ۷).

جدول (۷): جدول ویژگی‌های رطوبت نسبی شهر تبریز

ردیف	طبقات رطوبت نسبی	مساحت (ha)	درصد	درصد	تجمعی
۱	۵۰/۸۵-۵۲	۸۵۳۲/۱۷	۵۰	۵۰	۵۰
۲	۵۲-۵۴	۴۹۰۵/۵۱	۲۸/۷۴	۷۸/۷۴	۷۸/۷۴
۳	۵۴-۵۶	۲۹۰۴/۶۴	۱۷/۰۲	۹۵/۷۶	۹۵/۷۶
۴	۵۶-۵۸/۴۶	۷۲۳/۴۱	۴/۲۴	۱۰۰	۱۰۰



شکل (۹): نقشه رطوبت شهر تبریز



شکل (۸): نقشه روزهای یخبندان شهر تبریز

با توجه به جدول (۸) و شکل (۱۰)، توزیع فضایی و جغرافیایی عملکردهای مختلف در شهر تبریز شامل ۵ عملکرد کاربری بوده که کاربری شهری با ۷۲/۵ درصد بیش‌ترین سطح را شامل می‌شود و کاربری باغی-زراعی در مرتبه دوم کاربری اراضی قرار دارد.

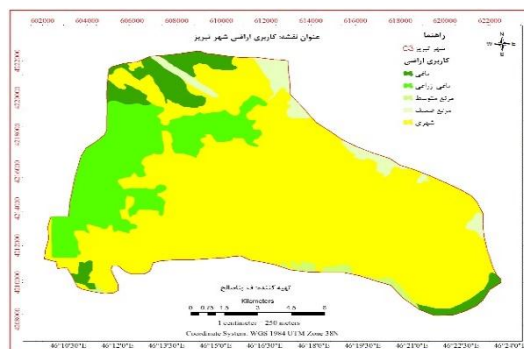
جدول (۸): جدول وضعیت کاربری اراضی شهر تبریز

ردیف	نام کاربری	مساحت (ha)	درصد	درصد	تجمعی
۱	باغی	۱۰۴۲/۵۶	۶/۱۱	۶/۱۱	۶/۱۱
۲	باغی-زراعی	۲۹۰۸/۱۵	۱۷/۰۴	۲۳/۱۵	۲۳/۱۵
۳	شهری	۱۲۲۹۵/۶۷	۷۲/۰۵	۹۵/۲۰	۹۵/۲۰
۴	مرتج ضعیف	۶۳۱/۵۶	۳/۷۰	۹۸/۹۰	۹۸/۹۰
۵	مرتج متوسط	۱۸۸/۲۷	۱/۱۰	۱۰۰	۱۰۰

برای تهیه لایه ساعات آفتابی از مجموع ساعات آفتابی ده سال ایستگاه هواشناسی استفاده شد. بیش از ۴۵ درصد از سطح شهر تبریز دارای ۲۴۰۰-۲۳۰۰ ساعت در سال از تابش آفتاب بهره مند می‌شوند.

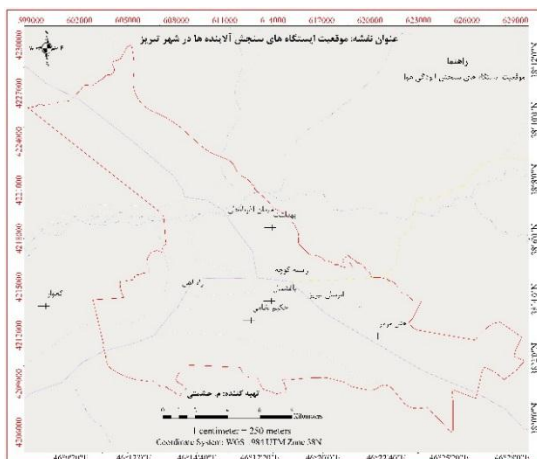
رطوبت نسبی یکی از عناصر سازنده جوی است که از جهات مختلف بر روی انسان، گیاه و حیوانات اثر دارد. شناخت وضع رطوبت نسبی هوا و توزیع ماهانه و سالانه آن برای برنامه ریزی کشت و انتخاب نوع مصالح و ابزارها برای سازه‌ها از اهمیت ویژه‌ای

جمعیت به بیش از ۶۰٪ می‌رسد. در این تحقیق داده‌های مورد استفاده آمار ساعتی مربوط به ۹ ایستگاه فعال سنجش آلودگی (شکل‌های (۱۲) و (۱۳)) مربوط به ایستگاه هواشناسی سینوپتیک شهر تبریز می‌باشد.

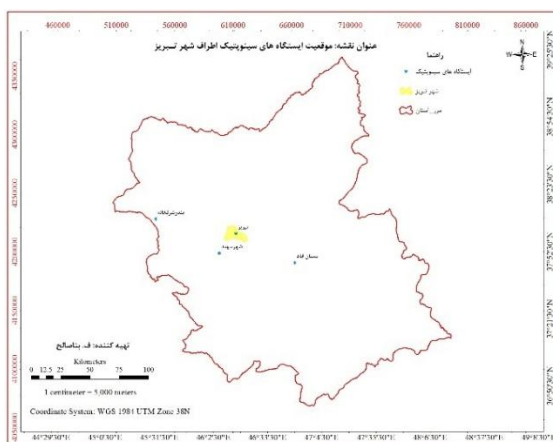


شکل (۱۰): نقشه وضعیت کاربری اراضی شهر تبریز

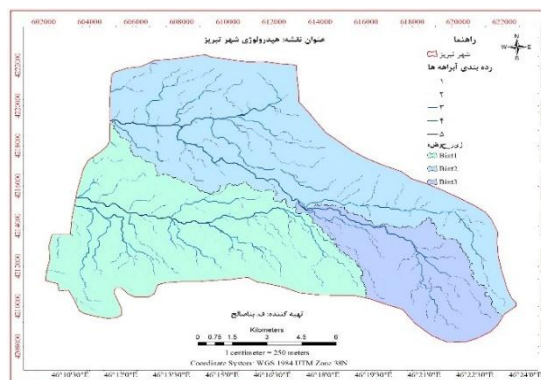
با توجه به آمار سیل‌های رخ داده در حوضه‌هایی که موقعیت آن‌ها در شکل (۱۱) نشان داده شده است، اغلب سیل‌ها در تیر ماه و مرداد ماه اتفاق افتاده‌اند. در حالیکه در این دو ماه، کم‌ترین مقدار بارش سالانه را شاهد هستیم و بارش‌ها معمولاً به صورت رگبار و ناگهانی است که در فاصله زمانی کوتاهی باعث به راه افتادن سیل می‌شود (۱۷).



شکل (۱۲): موقعیت ایستگاه‌های سنجش آلاینده تبریز



شکل (۱۳): موقعیت ایستگاه‌های سینوپتیک تبریز



شکل (۱۱): نقشه هیدرولوژی و زیر حوضه‌های شهر تبریز

## نتایج و بحث

### - توزیع زمانی و مکانی انواع گازهای آلاینده

مطالعه و پایش آلودگی هوا در مناطق شهری از اهمیت بالایی برخوردار است. برآوردهای جدید نشان می‌دهد که بیش از ۴۵٪ جمعیت جهان در شهرها زندگی می‌کنند و تا سال ۲۰۳۰ این نرخ

توزیع آلاینده‌های گاز  $NO_2$  در جدول (۹)، گاز CO در جدول (۱۰)، گاز  $O_3$  در جدول (۱۱) و گاز  $SO_2$  در جدول (۱۲) در مناطق شهر تبریز در مدت زمان ده ساله (۱۴۰۱-۱۳۹۱) در فصول سال ارائه شده است:

جدول (۹): جدول توزیع گاز (NO<sub>2</sub>)

منطقه ماه	کم	متوسط	زیاد
فروردین	۷	۱.۲.۳.۵.۶.۹	۴.۸.۱۰
اردیبهشت	۴.۶.۷.۱۰	۱.۲.۳.۵.۹	۸
خرداد	۷	۱.۲.۳.۵.۶.۹	۱۰.۸.۴
تیر	۴.۶.۷.۱۰	۱.۲.۳.۵.۹.۱۰	۸
مرداد	۷	۶	۱.۲.۳.۴.۵.۷.۸.۹.۱۰
شهریور	۴.۶.۷	۱.۲.۵.۹.۱۰	۳.۸
مهر	۶.۷.۱۰	۱.۲.۳.۴.۵.۹	۸
آبان	۴.۶.۷.۱۰	۱	۲.۳.۵.۸
آذر	۳.۸	۶.۷.۱۰	۱.۲.۴.۵.۹
دی	۸	۴.۷.۶	۱.۲.۳.۵.۹.۱۰
بهمن	۳.۶.۷.۱۰	۲.۴.۵.۹	۱.۸
اسفند	۸	۳.۴.۶.۷	۱.۲.۵.۹.۱۰

جدول (۱۱): جدول توزیع گاز (O<sub>3</sub>)

منطقه ماه	کم	متوسط	زیاد
فروردین	۸.۱۰	۹.۵.۴.۳.۲.۱	۷.۶
اردیبهشت	۸.۱۰	۹.۵.۴.۳.۲.۱	۷.۶.۳
خرداد	۸.۱۰	۹.۵.۴.۳.۲.۱	۷.۶
تیر	۸.۱۰	۹.۶.۵.۴.۳.۲.۱	۷.۳
مرداد	۸.۱۰	۶.۴	۹.۷.۵.۳.۲.۱
شهریور	۸.۱۰	۹.۶.۵.۴.۳.۲.۱	۷
مهر	۸.۱۰	۹.۵.۴.۳.۲.۱	۷.۶
آبان	۱۰.۹.۸.۵.۴.۳.۲.۱	۶	۷
آذر	۱۰.۹.۸.۵.۳.۲.۱	۶.۴	۷
دی	۸.۷.۳.۱	۱۰.۹.۶.۵.۲	۴
بهمن	۱۰.۹.۸.۵.۴.۳.۲.۱	۶	۷
اسفند	۱۰.۸.۳.۱	۶.۴	-

جدول (۱۰): جدول توزیع گاز (CO)

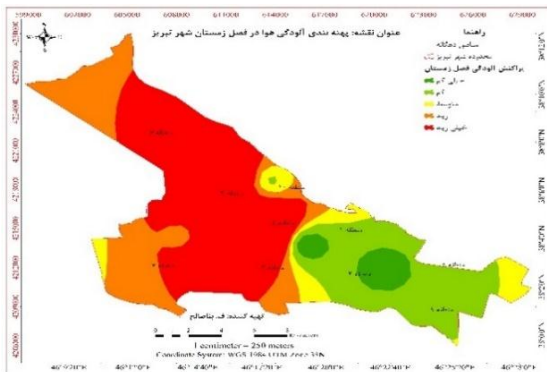
منطقه ماه	کم	متوسط	زیاد
فروردین	۸.۱	۲.۴.۵.۶.۹	۳.۷
اردیبهشت	۱.۲	۳.۵.۸.۹	۴.۶.۷.۱۰
خرداد	۱.۷	۲.۴.۵.۶.۹	۳.۸.۱۰
تیر	۱.۲	۵.۹	۳.۴.۶.۷.۸.۱۰
مرداد	۱.۲	۵.۹	۳.۴.۶.۷.۸.۱۰
شهریور	۱.۲	۵.۹	۳.۴.۶.۸.۱۰
مهر	۱.۳	۲.۵.۹	۴.۶.۷.۸.۱۰
آبان	۳	۱.۲.۵.۹	۴.۶.۷.۸.۱۰
آذر	۱.۲.۳.۵.۹	۴.۶.۱۰	۷.۸
دی	۱.۲.۵.۹	۳.۶.۷	۴.۸.۱۰
بهمن	۱۰	۱.۲.۳.۴.۵.۶.۹	۷.۸
اسفند	۳	۱.۲.۴.۶.۵.۷.۸.۹.۱۰	-

جدول (۱۲): جدول توزیع گاز (SO<sub>2</sub>)

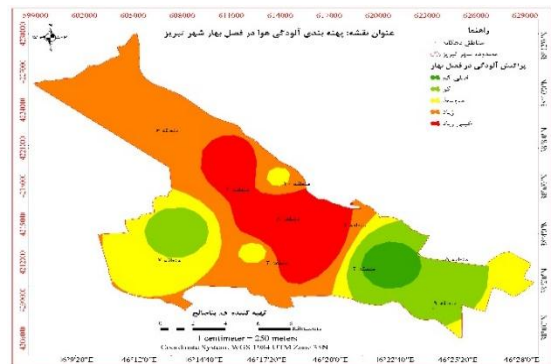
منطقه دما	کم	متوسط	زیاد
فروردین	۷	۶.۴	۱۰.۹.۸.۵.۳.۲.۱
اردیبهشت	-	۱۰.۸.۶.۴	۷
خرداد	۹.۵.۳.۲.۱	۱۰.۹.۸.۵.۴.۳.۲.۱	۸.۷.۶
تیر	۹.۵.۳.۲.۱	۱۰.۹.۸.۵.۲	۷
مرداد	۵.۳.۲.۱	۱۰.۸.۶.۴	۷
شهریور	۱۰.۹.۵.۳.۲.۱	۱۰.۸.۶	۷.۴
مهر	۵.۳.۲.۱	۸.۶.۴	۷
آبان	۹.۵.۳.۲.۱	۱۰.۹.۸.۶.۴	۷
آذر	۵.۳.۲.۱	۱۰.۸.۴	۷.۶
دی	۳.۱	۱۰.۹.۸.۵.۲	۷.۶.۴
بهمن	۹.۵.۲.۱	۱۰.۸.۴	۷.۶.۳
اسفند	۹.۸.۵.۳.۲.۱	۶	۴

توزیع فصلی آلودگی هوای تبریز

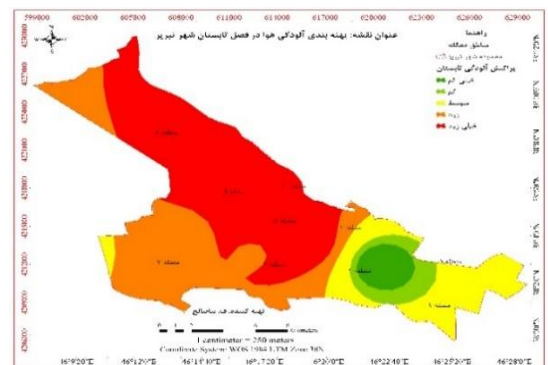
میزان آلودگی فصلی شهر تبریز در دوره مورد مطالعه (۱۴۰۱-۱۳۹۱) بر اساس آمارهای ۹ ایستگاه آلودگی سنجی به دست آمده است. نقشه‌های پهنه-بندی آلودگی هوا در شکل‌های (۱۴)، (۱۵) و (۱۶) از طریق نرم افزار Arc GIS به دست آمدند و مورد مقایسه و تحلیل قرار گرفتند.



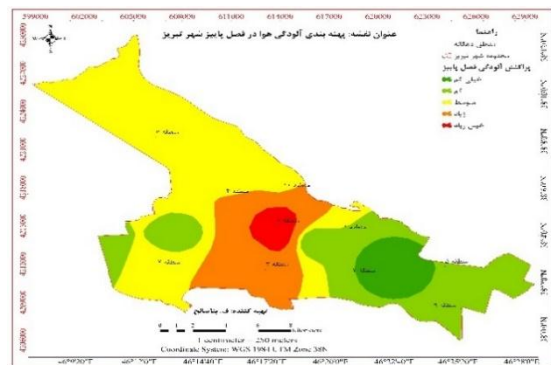
شکل (۱۷): پهنه‌بندی آلودگی فصل زمستان شهر تبریز



شکل (۱۴): پهنه‌بندی آلودگی در فصل بهار شهر تبریز



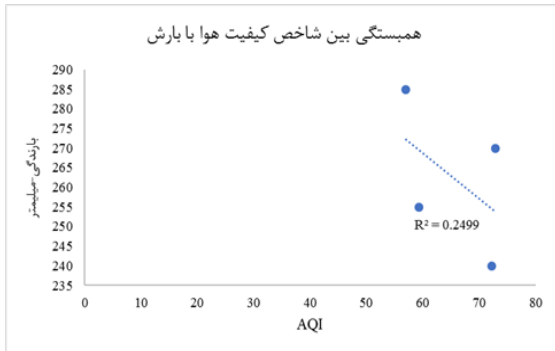
شکل (۱۵): پهنه‌بندی آلودگی در فصل تابستان شهر تبریز



شکل (۱۶): پهنه‌بندی آلودگی فصل پاییز شهر تبریز

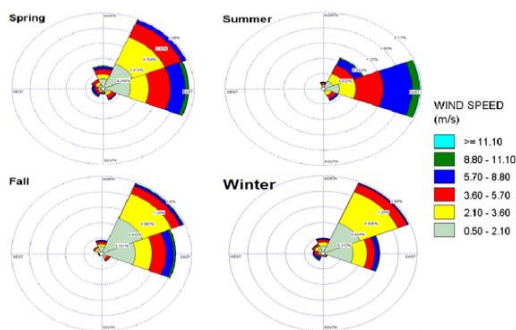
بررسی نقش عناصر اقلیمی در آلودگی هوا - تغییرات آب و هوایی و تغییر الگوی جوی، وارونگی دمایی از عوامل موثر در افزایش آلودگی هوای شهرها می‌باشند. شهر تبریز به علت توپوگرافی خاص خود مانند یک گودال از سه جهت شمال، شرق و جنوب به ارتفاعات و از سمت غرب به دشت تبریز محدود می‌شود که این عوامل به انتقال آلاینده‌ها بر روی این شهر و محصور شدن در آنجا منجر می‌گردد. با توجه به نقشه شکل (۱۸) با افزایش ارتفاع از میزان آلودگی کاسته می‌شود ولی این ارتباط خطی و مستقیم نیست. هر کدام از نقاط موجود در شکل (۱۹) نشان دهنده تعداد آلاینده‌های مورد مطالعه در این تحقیق می‌باشد و نوع ارتباط هم-بستگی این آلاینده‌ها با متغیر مستقل شاخص کیفیت هوا (AQI) و متغیرهای وابسته (عوامل اقلیمی مورد نظر) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند.

شکل (۲۰): نقشه ارتباط مکانی پارامتر بارندگی و آلودگی هوا



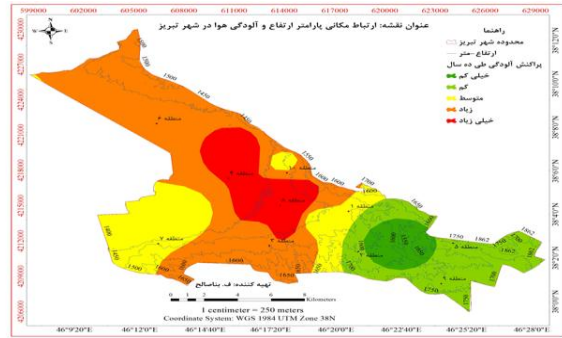
شکل (۲۱): نمودار ضریب همبستگی بین شاخص کیفیت هوا با بارش

جهت باد غالب در منطقه شمال شرقی و شرقی می باشد. با توجه به سرعت بالای باد در فصل بهار و تابستان آلودگی های سمت شرقی به طرف شهر حرکت می کنند و موجب افزایش غلظت آلاینده ها می گردد. به دلیل استقرار صنایع آلاینده در غرب تبریز، افزایش آلودگی در فصل سرد سال دیده می شود زیرا سرعت بالای بادهای جنوب غربی و غربی، مخصوصاً در فصل سرد سال، می تواند این آلودگی ها را پراکنده و به اطراف شهر تبریز حمل کنند (شکل (۲۲)). (۲۳)، نشان می دهد همبستگی معناداری بین شاخص کیفیت هوا با عامل جهت باد در شهر تبریز وجود دارد.

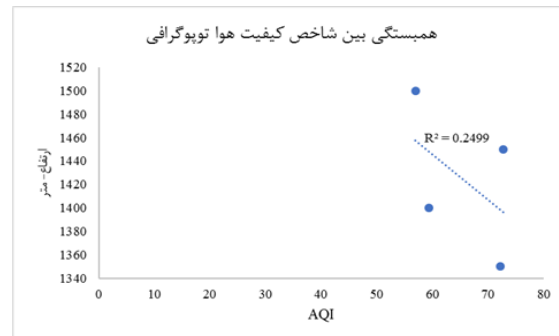


شکل (۲۲): جهت وزش باد برای ایستگاه سینوپتیک شهر

تبریز

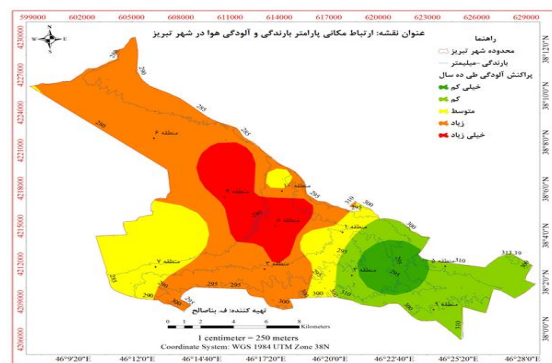


شکل (۱۸): نقشه ارتباط مکانی پارامتر ارتفاع و آلودگی هوا

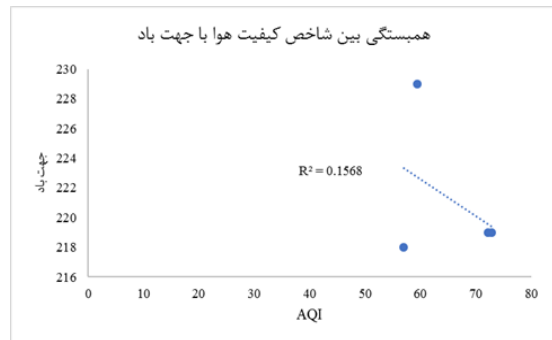


شکل (۱۹): نمودار ضریب همبستگی بین شاخص کیفیت هوا با توپوگرافی

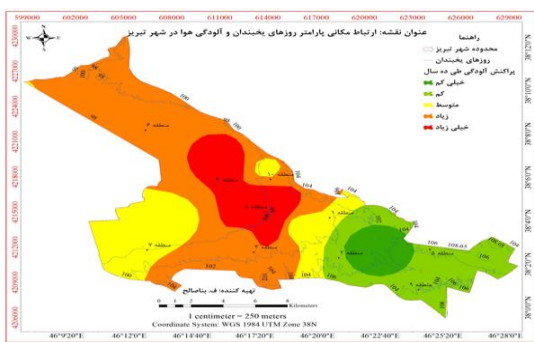
آلودگی هوا در کلان شهرهایی چون تبریز می تواند در کاهش میزان بارندگی در فصول مختلف سال نقش بسزایی داشته باشد (شکل (۲۰)). آلودگی هوا نه تنها بر میزان بارش، بلکه بر نوع ابرهایی که در یک منطقه شکل می گیرد و نیز بر میزان رطوبت آن منطقه مؤثر است (۱۸). همبستگی نشان داده شده در شکل (۲۱)، بیان کننده وجود همبستگی معنی دار بین پارامتر اقلیمی بارندگی و شاخص کیفیت هوا می باشد.



رابطه مستقیم و معنی‌داری بین وارونگی دمایی با تشدید غلظت آلاینده‌ها وجود دارد. به دلیل اهمیت این موضوع در شهر تبریز، ارتباط وارونگی‌های دمایی این شهر از سال ۱۳۹۱ تا ۱۴۰۱ مورد بررسی قرار گرفت و نتایج در شکل‌های (۲۶) و (۲۷) نشان داده شده است، کاهش دما و افزایش روزهای یخبندان موجب افزایش آلودگی در منطقه مطالعاتی می‌شود.

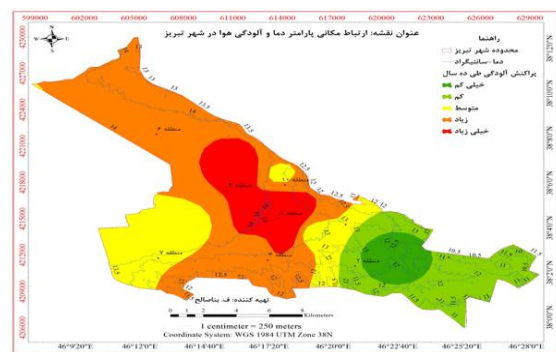


شکل (۲۳): نمودار ضریب هم‌بستگی بین شاخص کیفیت هوا با جهت باد

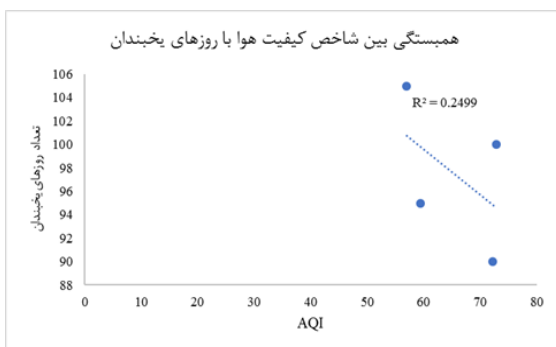


شکل (۲۶): ارتباط مکانی پارامتر یخبندان و آلودگی هوای شهر تبریز

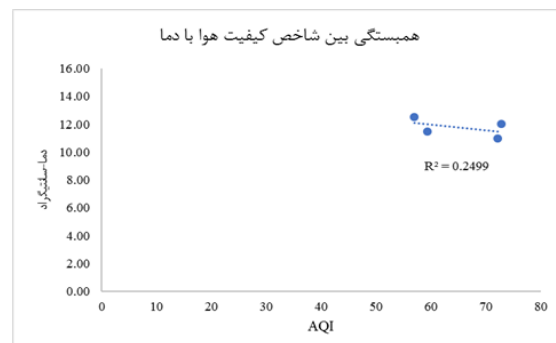
با توجه به شکل‌های (۲۴) و (۲۵)، آلاینده مونوکسید کربن با افزایش دما افزایش می‌یابد (ارتباط مستقیم) و بر عکس میزان گاز دی‌اکسید گوگرد با افزایش دما کاهش می‌یابد (ارتباط معکوس) (۱۹).



شکل (۲۴): ارتباط مکانی پارامتر دما و آلودگی هوای شهر تبریز



شکل (۲۷): نمودار ضریب هم‌بستگی بین شاخص کیفیت هوا با روزهای یخبندان

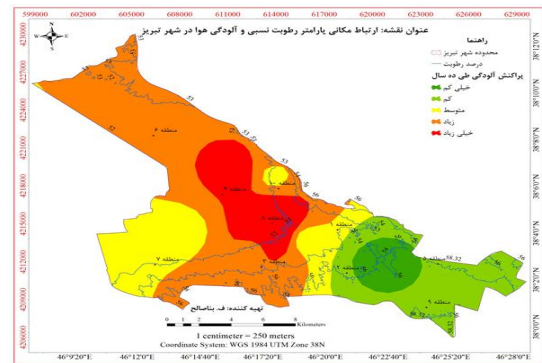


شکل (۲۵): نمودار ضریب هم‌بستگی بین شاخص کیفیت هوا با دما

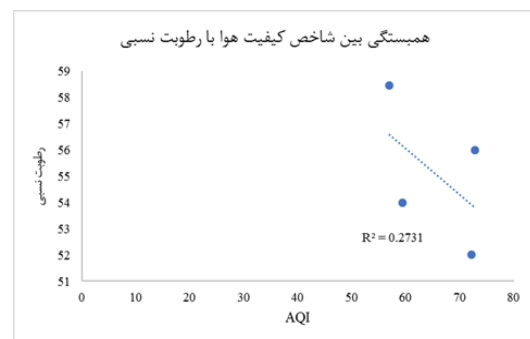
رطوبت نسبی از دیگر پارامتر مورد مطالعه در تاثیر آن در میزان آلودگی هوای شهر تبریز می‌باشد. در تحلیل‌های هم‌بستگی شکل‌های (۲۸) و (۲۹)، مشخص گردید با افزایش رطوبت نسبی هوا از میزان آلودگی هوا کاسته شده است.



در نرم‌افزار GIS تهیه گردید. نتایج نشان داد علاوه بر موقعیت جغرافیایی و توپوگرافی شهر تبریز به ویژه قرار گرفتن کوه‌های زینال و عینال در سمت شمال غربی، کاربری‌های تجاری، اداری و صنعتی، سرانه پایین معابر و فضای سبز از عمده‌ترین عوامل ایجاد آلودگی در نواحی مرکزی و غربی شهر تبریز می‌باشد. همچنین بیش‌ترین تراکم آلودگی در شهر متعلق به شمال شرق، شرق و مرکز تبریز است، جایی که در آن بافت فرسوده شهر نیز وجود دارد. از سوی دیگر نواحی پیرامونی شهر با ازدحام کم‌تر و تراکم پایین‌تر ساختمانی دارای کم‌ترین آلودگی می‌باشند. بر اساس نتایج حاصل از پژوهش، کیفیت هوای شهر تبریز طی ده سال گذشته در فصل بهار و زمستان به نحوی بود که در سمت شرق و شمال شرق شهر، شاخص کیفیت آلودگی هوا (AQI) عدد بالایی را نشان می‌دهد به عبارتی هوای این محدوده‌ها مطلوبیت کم‌تری نسبت به سایر مناطق شهر داشته اما در کل هوا کیفیت سالمی داشته است. بررسی‌های انجام گرفته در این تحقیق نشان می‌دهد که با افزایش ارتفاع، از میزان پراکنش آلاینده‌های مورد مطالعه کاسته می‌شود، ولی این نوع کاهش، دارای ارتباط همبستگی خطی نمی‌باشد. در صورت وجود بارش-های مکفی در منطقه، از شدت آلاینده‌ها کاسته می‌شود که نشان دهنده ارتباط همبستگی معکوس بین عامل اقلیمی بارش و آلاینده‌های مورد مطالعه است. نتایج همچنین نشان داد، در سرعت‌های بالاتر باد و مدت زمانی که بادی وجود ندارد، پراکنش آلاینده‌ها در سطح شهر به صورت نامنظم می‌باشد، در حالیکه در سرعت‌های متعادل باد و همسو با جریان‌های



شکل (۲۸): ارتباط مکانی پارامتر رطوبت نسبی و آلودگی هوای شهر تبریز



شکل (۲۹): نمودار ضریب همبستگی بین شاخص کیفیت هوا با رطوبت نسبی

### نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر به منظور بررسی روابط مکانی بین عوامل اقلیمی و آلودگی هوا در ۱۰ سال گذشته شهر تبریز انجام گرفته است. روش تحقیق توصیفی و تحلیلی و نوع اطلاعات اسنادی - کتابخانه‌ای می‌باشد. در این راستا از پنج پارامتر آلاینده جوی  $SO_2$ ،  $NO_2$ ،  $O_3$  و  $CO$  به عنوان متغیرهای مستقل و از شاخص کیفیت هوا (AQI) به عنوان متغیر وابسته استفاده گردید. برای سنجش آلودگی هوای شهر تبریز در کلیه ماه‌ها و فصل‌های سال و در بازه زمانی ۱۳۹۱ تا ۱۴۰۱ از تکنیک درونیابی IDW استفاده شد. سپس نقشه‌های ارتباط کیفیت هوای شهر با پارامترهای اقلیمی با استفاده از روش روی هم‌گذاری

پیشنهاد می‌گردد در تمامی ایستگاه‌های سنجش آلودگی هوا، سنجنده‌های آلودگی شاخص هوا نصب گردد.

### تعارض منافع

نویسندگان هیچ‌گونه تعارض منافی برای اعلام ندارند.

### منابع

- [1] Rodrigue, J.P., 2016, The geography of transport systems. 4th Edition, Routledge, pp. 454.
- [2] Ernani, M.Z., Ashraf, Z.G., 2013, Assessment of land cover changes in arid lands using ASTER and ETM+ sensors (Case study: Marvast Plain, Yazd Province), Desert Management, 1, 39. (in Persian)
- [3] Couture, T., Busch, H., Hansen, T., Leidreiter, A., 2019, Renewables in cities. 2019 global status report, REN21.
- [4] Shokrzadeh, M., Poorhossein, M., Nasri Nasr Abadi, N., Veisi, F., Koshki, Z., 2013, Epidemiologic study of mortality rate from carbon monoxide poisoning recorded in Mazandaran department of forensic medicine, 2009-2011, Journal of Mazandaran University of Medical Sciences, 23, 86. (in Persian)
- [5] Velayati, S., Kadivar, A.A., 2006, Environmental problems of forests and pastures in Iran and the consequences, Journal of Geography and Regional Development, 7, 53. (in Persian)
- [6] D'Amato, G., Pawankar, R., Vitale, C., Lanza, M., Molino, A., Stanziola, A., D'Amato, M., 2016, Climate change and air pollution: Effects on respiratory allergy, Allergy Asthma Immunology Research, 8, 391.
- [7] Allahabadi, A., Asoor, A.A., 2011, Measuring the air pollutants in Sabzevar, Iran, Journal of Sabzevar University of Medical Sciences, 18, 140. (in Persian)
- [8] Ghorbani Sepehr, A., Amraie, M., Ghaloojeh, M., Daneshvar, P., 2020, Investigating the effect of climate change on air pollution in metropolises, Geography and Human Relationship, 3, 330. (in Persian)

غالب بادی منطقه، از شدت ماندگاری آلاینده‌ها کاسته می‌شود.

با افزایش عامل اقلیمی دما، آلاینده‌هایی همچون گاز مونوکسیدکربن به صورت تدریجی افزایش می‌یابد که نشان دهنده وجود ارتباط همبستگی مستقیم بین دما و گاز مونوکسید کربن است؛ در حالیکه با افزایش دما، از شدت پراکنش گاز دی اکسیدگوگرد کاسته می‌شود که نشان دهنده وجود ارتباط همبستگی معکوس بین این آلاینده و عامل اقلیمی دما است. همچنین مشخص گردید، با افزایش میزان رطوبت نسبی هوا، شدت پراکنش و ماندگاری آلاینده‌های مورد مطالعه کاهش می‌یابد. در مجموع طی سال‌های مورد مطالعه، شاخص کیفیت هوای شهر تبریز به شرایط ناسالم نرسیده، ولی با این وجود غلظت آلاینده‌های هوا در روزهایی از سال با توجه به شرایط آب و هوایی (وارونگی دمایی، جهت وزش باد) افزایش یافته و منجر به گسترش آلودگی هوا گردیده است.

به منظور ادامه روند مطالعه گسترده‌تر در این زمینه و ارائه خط فکری جهت مسیر آینده پژوهش‌های مرتبط پیشنهاداتی مطرح گردید. به نظر می‌رسد علاوه بر پارامترهای اقلیمی سایر پارامترها از جمله پارامترهای شهرسازی و حجم ترافیک بصورت همزمان با پارامترهای اقلیمی منجر به استخراج داده‌های مفیدتری در این بازه خواهد بود. ارزیابی مکان‌های مناسب جهت استقرار ایستگاه‌های جدید سنجش آلودگی در سطح شهر تبریز نیاز به مطالعات بیشتر دارد. کالیبراسیون آنالیزورهای دستگاه‌های سنجش آلودگی هوا در ایستگاه‌های شهر تبریز در بازه‌های زمانی مناسب پایش گردیده و همچنین

- [19] Khorshiddoost, A.M., Mohammadi, G.H., Aghlmand, F., Hosseini Sadr, A., 2018, Descriptive-statistical analysis of the relationship between atmospheric conditions and urban pollution in Tabriz, *Journal of Environmental Hazards Management*, 5, 217.
- [9] Mansouri, B., Hamidian, A.H., 2013, Assessment of the air quality of Isfahan city, Iran, using selected air quality parameters, *Iranian Journal of Toxicology*, 7, 842.
- [10] Ramezani, N.A., Alijani, B., Borna, R., 2018, Explaining the effects of climate elements in Tehran's metropolis air Quality, *Geographical Researches Quarterly Journal*, 33, 154. (in Persian)
- [11] Rezaeyan, M., 2022, Comparison of development trends of Tehran and Isfahan cities and its effects on vegetation, climate and air pollution using GEE, *Giovanni, Journal of Nature and Spatial Sciences*, 2, 143.
- [12] Mousavi, A., Ardalan, A., Takian, A., Ostadtaghizadeh, A., Naddafi, K., Massah Bavani, A., 2020, Climate change and health in Iran: A narrative review, *Journal of Environmental Health Science & Engineering*, 18, 367.
- [13] IPCC, 2007: Climate change 2007: Synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Geneva, Switzerland, pp. 104.
- [14] Ghasemibactash, A., Mirhashemi, H., Rasouli, A., 2015, Effect on planetary climate modeling precipitation indices in East Azarbaijan case study: city of Tabriz, *Geography and Environmental Planning*, 56, 187. (in Persian)
- [15] Dinpazhooh, Y., Niazi, F. Mofid, H., 2015, Trend analysis and considering effect of meteorological parameters in Tabriz, *Journal of Geography and Planning*, 19, 145.
- [16] Shafaati, A., Valizadeh, R., Rahimi, A., Panahi, A., 2022, Compilation of the effective indicators of the smart city in the intermediate development of the 8th district of Tabriz, *Journal of Sustainable City*, 5, 125.
- [17] Choubin, B., Sajedi Hosseini, F., Rahmati, O., Mehdizadeh Youshanloei, M., Jalali, M., 2022, Temporal and spatial variation of dust days in Western Azarbaijan Province, determination of the influencing factors and source of events, *Journal of Desert Management*, 10, 71. (in Persian)
- [18] Sobhani, B., Shokrzadeh Fard, E., Piroozi, E., 2018, Evaluation and zoning of air pollution using AHP and ANP methods. Case study: Tabriz city. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 8, 153. (in Persian)

“Research article”

## The spatial relationship between climatic factors and air pollution in the last 10 years of Tabriz city

### Spatial relationship between climatic and pollution

**Fahimeh Banasaleh**

Environmental Education Department, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

**Mohammad Ebrahim Ramazani\***

Department of Environmental Engineering, Research Center for Sustainable Development Management of Urmia Lake and Aras River Basin, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

**Ziba Beheshti**

Researcher of the Sustainable Development Management Research Center of Urmia Lake and Aras River Basin, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

\*Corresponding author: ramazani@iaut.ac.ir

(Received: 25 January 2024, Accepted: 17 February 2024)

#### Abstract

Air pollution poses a significant threat to many cities in Iran, with Tabriz the bustling metropolis, being particularly affected. Factors such as rapid population growth, rural migration, industrial expansion, vehicular density, topographical features and natural factors have collectively contributed to Tabriz becoming one of Iran's most polluted cities. Beyond human-related factors, geographical factors including location, topography, and temperature inversions also play a crucial role in exacerbating air pollution in Tabriz. In this research, descriptive research methods drawing from meteorological and air pollution data sources were employed to investigate the spatial relationship between climatic factors and air pollution in Tabriz. By collecting and analyzing information from meteorological stations in Tabriz and air quality measurement stations related to Tabriz, we created integrated maps using Geographical Information System (GIS) software. These maps visually depicted pollution distribution and zoning. According to the results of the research, a significant spatial relationship and correlation exist between meteorological parameters and air pollution parameters. Additionally, the distribution of air pollution parameters across the surface of Tabriz city reveals that the highest pollution levels, attributed to polluting gases such as SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, and CO, occur in the western and central parts of the city. Conversely, suspended particles contribute to the most pollution in the eastern side of Tabriz. Furthermore, the seasonal quality index indicates that summer and spring experience the least air pollution, while autumn and winter exhibit the highest levels.

**Conflict of interest:** None declared.

**Keywords:** Spatial relationship, Climatic factors, Air pollution, Significant correlation, Tabriz



دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز  
فصلنامه آلودگی‌های محیطی و توسعه پایدار شهری

دوره اول، شماره ۱، پیاپی ۱  
بهار ۱۴۰۳، صفحات ۸۷-۶۹

## "مقاله پژوهشی"

### مقایسه تطبیقی وضعیت توسعه پایدار از لحاظ ابعاد اجتماعی - محیطی - اقتصادی

(نمونه موردی: مناطق ۲ و ۶ شهرداری تبریز)

مصطفی رنجوری هروی

دانشجوی کارشناسی ارشد طراحی شهری، واحد آذرشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، آذرشهر، ایران

سعیده فیضی\*

استادیار گروه معماری و شهرسازی، واحد آذرشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، آذرشهر، ایران

Sa.feizi@iau.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۹/۰۱، پذیرش نهایی: ۱۴۰۳/۰۲/۱۷)

## چکیده

توسعه پایدار به معنی تلفیق اهداف اجتماعی، محیطی و اقتصادی برای ایجاد آسایش انسان بدون آسیب رساندن به توانایی‌های نسل آینده در برآوردن نیازهایشان می‌باشد. شکل‌گیری شهرها که به لحاظ بعد اجتماعی، محیطی و اقتصادی پایدار بوده و توانایی مقابله با چالش‌های رشد شتابان جمعیت و مهاجرت را داشته باشد یکی از اصلی‌ترین وظایف قرن حاضر است. در چند دهه گذشته رشد شتابان شهرنشینی و گسترش فعالیت‌های صنعتی، زیرساخت‌های شهری را کاهش و ضایعات زیست‌محیطی را افزایش داده است. بعد اجتماعی - محیطی و اقتصادی توسعه پایدار شهری ابزاری مفید در خدمت انسجام شهری است. از این رو بررسی توسعه پایدار شهر تبریز دارای اهمیت زیادی است. در این پژوهش پس از بررسی ادبیات موضوع و همچنین برداشت‌های میدانی و تکمیل پرسشنامه‌ها به مقایسه تطبیقی ابعاد اجتماعی - محیطی و اقتصادی توسعه پایدار شهر تبریز در مناطق ۲ و ۶ پرداخته شده است. روش تحقیق پژوهش حاضر به صورت توصیفی و میدانی بوده که به وسیله پرسشنامه در گروه‌های مختلف ساکنین، کارشناسان و متخصصین مناطق ۲ و ۶ انجام گرفته است. در این پژوهش تحلیل‌ها بر اساس نرم‌افزار SPSS مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد، وضعیت پایدار شهری در منطقه ۲، با ۱۰۵-۵ امتیاز، در سه طیف ضعیف ۳۸-۵، متوسط ۷۲-۳۹ و خوب ۱۰۵-۷۳، رتبه‌بندی گردید. وضعیت پایدار شهری، در منطقه ۶، ۰٪ ضعیف، ۷۷/۵۷٪ متوسط و ۲۲/۴۲٪ خوب و در منطقه ۶، ۱۱/۱۱٪ ضعیف، ۸۸/۴۸٪ متوسط و ۰٪ خوب ارزیابی گردید. رضایت ساکنین و کارشناسان در زمینه پایدار شهری منطقه ۲ نسبت به پایدار شهری منطقه ۶ بیش‌تر می‌باشد. با توجه به اینکه توسعه پایدار به‌عنوان مقوله مهم برنامه‌ریزی شهری است از این رو ضرورت برنامه‌ریزی و آینده‌نگری در مناطق مختلف شهر تبریز با توجه به شرایط منحصربه‌فرد هر منطقه بایستی در برنامه‌ریزی فضاهای شهری با در نظر گرفتن رویکرد توسعه پایدار مورد توجه قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: توسعه پایدار، شهر تبریز، بعد اجتماعی - محیطی، فضاهای شهری

## مقدمه

شهرنشینی به‌عنوان دومین انقلاب در فرهنگ انسان، باعث دگرگونی در روابط متقابل انسان‌ها با یکدیگر گردیده بطوریکه با افزایش جمعیت شهرنشین، بهره‌برداری از محیط تشدید می‌گردد. در چند دهه گذشته رشد شتابان شهرنشینی و گسترش فعالیت‌های صنعتی، زیرساخت‌های شهری را کاهش و ضایعات زیست‌محیطی را افزایش داده است. در لغت‌نامه دهخدا پایداری به معنای با دوام و ماندنی آمده است. در فرهنگ معین این واژه به معنای پایدار بودن و مقاومت از مصدر پایش به معنای پایداری کردن و استقامت نشان دادن است. فعل Sustain از ریشه لاتین Sustinere و از دو جزء Su به معنای از پایین به بالا و Tinere به معنای نگه داشتن و حفظ کردن تشکیل شده و از سال ۱۲۹۰ در زبان انگلیسی به کار گرفته شده است. این فعل با مفاهیمی از قبیل حمایت، پشتیبانی و تداوم آمیخته است و صفت sustainable در توصیف شرایط، حالت و یا چیزی به کار می‌رود که مورد پشتیبانی قرار گرفته یا به‌واسطه کمک یا تأمین معاش، همچنان تداوم یافته است [۱]. شهر تبریز یکی از کلان‌شهرهای تاریخی کشورمان محسوب می‌شود که از نظر تقسیمات شهری به ۱۰ منطقه تقسیم می‌شود. منطقه ۲ تقریباً دارای بافت جدید و توسعه یافته بوده و همچنین امکانات مختلفی را دارا هست این در حالی است که روند رشد جمعیت در مناطقی از شهر که قبلاً روستا بوده سپس به شهر پیوسته‌اند مانند منطقه ۶ دارای رشد کاهنده‌ای بوده است. فرسودگی بافت مناطق قدیمی و روستایی، آلودگی‌های زیست‌محیطی و شهری بیش‌ترین جلوه را در این منطقه دارند. زیرساخت‌ها و خدمات شهری

امروزی پوشش مناسب را در این مناطق ندارند. همه این عوامل باعث کاهش ارزش‌های باقی‌مانده و میزان شاخص‌های پایداری شهری و محله‌ای در این مناطق شده است. هدف ارزیابی شاخص‌های توسعه پایدار در ابعاد اجتماعی - محیطی و اقتصادی در منطقه ۲ و منطقه ۶ شهر تبریز در جهت پاسخگویی به سؤالات زیر هست:

- وضعیت توسعه پایدار از لحاظ ابعاد اجتماعی - محیطی و اقتصادی در دو منطقه ۲ و ۶ به چه شکل است؟

- مقایسه وضعیت توسعه پایدار از لحاظ سه بعد مورد نظر، از دیدگاه کارشناسان دو منطقه و ساکنان دو منطقه و متخصصان، به چه شکل است؟

- چه راهکارهایی جهت بهبود توسعه پایدار از لحاظ سه بعد مورد نظر، در دو منطقه ۲ و ۶ می‌توان انجام داد؟

## پیشینه پژوهش

در جدول (۱) مقالات و پایان‌نامه‌های داخلی و خارجی بر اساس عنوان اثر و نتیجه‌گیری که از کل مقاله بر اساس دیدگاه نگارندگان اتخاذ شده تهیه و گردآوری شده است.

## مبانی نظری

توسعه پایدار یک مفهوم قابل بحث با دامنه گسترده‌ای از معانی است. در یک سطح انتزاعی و ذهنی، پایداری با حفاظت و یا بهبود دستگاه‌های یکپارچه طبیعی که در کل، زندگی در روی سیاره‌مان را شامل می‌شود، ارتباط دارد [۲]. نقطه مرکزی و کانون این دستگاه‌ها و پایداری‌شان جمعیت انسانی است، به این دلیل که سلطه انسان‌ها و فعالیت‌هایشان به‌طور فراوانی محیط جهانی را متأثر کرده است.

جدول (۱): پیشینه مقالات داخلی و خارجی مرتبط با موضوع مقاله

ردیف	سال	نویسنده	عنوان اثر	نتیجه
۱	۱۴۰۰	باغبان- شکوهی	شناخت عوامل مؤثر بر توسعه پایدار شهری در شهر مشهد با رویکرد آینده پژوهی مطالعه موردی: مناطق شهری ۱ و ۲	هدف این پژوهش تحلیل و سنجش شاخص‌های پایداری در ناحیه ۱ منطقه ۱ و ناحیه ۲ به‌عنوان نمونه مطالعاتی است. نتایج تحقیق نشان‌دهنده پایداری کالبدی، اقتصادی و اجتماعی-فرهنگی ناحیه ۱ منطقه ۱ و پایداری کالبدی ناحیه ۱ منطقه ۲ است. در مجموع ناحیه ۱ منطقه ۱ نسبتاً پایدار و ناحیه ۱ منطقه ۲ ناپایدار ارزیابی شده است. لذا، می‌توان نتیجه گرفت که تنها توجه به شرایط کالبدی و عملکردی در میزان پایداری کافی نیست و عواملی چون وضعیت اقتصادی خانوارهای ساکن و عوامل اجتماعی - فرهنگی نیز در پایدار بودن یک ناحیه تأثیرگذار است. هدف این پژوهش، شناسایی علل و پیامدهای اجتماعی اسکان غیررسمی ناحیه ۹ منطقه ۲ شهرداری تهران محله فرحزاد بر اساس شاخصه‌های توسعه پایدار شهری است. بر اساس یافته‌های این پژوهش؛ بخش عمده اسکان غیررسمی محله فرحزاد، ناشی از مهاجرت برای دستیابی به زندگی بهتر است. حاشیه‌نشینان این محله از عدم رضایت و عدم تعلق اجتماعی شهروندی مواجه هستند. در نتیجه بهبود وضعیت اسکان و زیرساخت اجتماعی و فرهنگی از مهم‌ترین اولویت بهبود است.
۲	۱۴۰۰	سادات و همکاران	بررسی چالش ناپایداری اجتماعی در اسکان غیررسمی مبتنی بر شاخص‌های توسعه پایدار شهری (مطالعه موردی: منطقه ۲ تهران محله فرحزاد ۱)	مشاهدات پژوهشگر نشان داد، عواملی مانند شرایط اقتصادی مطلوب، شرایط اجتماعی مناسب و وضعیت مناسب فرهنگی و کالبدی، توجه و اهمیت به جایگاه والا و حقوق زن، پایین بودن میزان بافت قدیمی و فرسودگی ساختمان‌ها در منطقه یک و در مقابل، شرایط اقتصادی ضعیف، شرایط اجتماعی اسفناک، ضعیف فرهنگی و کالبدی نابسامان در منطقه هفده سبب شده است تا توزیع وظایف مراقبتی و در نتیجه شرایط زیستی و پایداری بین دو منطقه نابرابر باشند؛ یعنی کیفیت زندگی و پایداری شهری در منطقه هفده نسبت به منطقه یک، در سطح پایین‌تری قرار بگیرد...
۳	۱۳۹۹	رمضانی	وظایف مراقبتی، کیفیت زندگی و پایداری شهر (مطالعه تطبیقی: مناطق یک و هفده شهر تهران)	در پژوهش مورد نظر ارزیابی شاخص‌های توسعه پایدار شهری با تأکید بر شاخص‌های توسعه میان افزایش شهری در شهر اهواز در قالب سه بعد اجتماعی، کالبدی و فضایی از طریق بررسی ۳۳ شاخص صورت گرفت. نتایج حاکی از آن می‌باشد که از نظر شاخص خدمات شهری منطقه ۸ به‌عنوان محروم‌ترین مناطق از لحاظ توسعه پایدار شهری می‌باشد.
۴	۱۳۹۹	موزرمی و همکاران	ارزیابی توسعه پایدار شهری با تأکید بر شاخص‌های توسعه میان افزایش شهری (مطالعه موردی: مناطق هشت‌گانه شهر اهواز)	هدف پژوهش نقش کارکردی شهرهای کوچک در توسعه شاخص‌های پایداری شهرهای حوزه نفوذ مطالعه موردی: شهرستان نیک شهر است. نتایج اولویت‌بندی ابعاد توسعه اقتصادی و اجتماعی نشان داد، در بین ابعاد توسعه به ترتیب بعد اقتصادی رتبه اول و بعد اجتماعی رتبه دوم را به خود اختصاص داده‌اند. در نهایت نتایج رتبه‌بندی شهرهای حوزه نفوذ نیک شهر با تأکید بر ابعاد توسعه نشان داد که شهر اسپکه و شهر بنت به ترتیب، در اولویت اول و دوم قرار دارند.
۵	۱۳۹۹	رضازاده و همکاران	نقش کارکردی شهرهای کوچک در توسعه شاخص‌های پایداری شهرهای حوزه نفوذ (مطالعه موردی: شهرستان نیک شهر)	

## ادامه جدول (۱)

ردیف	سال	نویسنده	عنوان اثر	نتیجه
۶	۱۳۹۸	سرور و همکاران	ارزیابی توسعه پایدار شهری با تأکید بر شاخص‌های توسعه میان‌افزایی شهری (مطالعه موردی: مناطق هشتگانه شهر اهواز)	در این پژوهش شاخص‌های توسعه میان‌افزایی شهری در شهر اهواز در قالب سه بُعد اجتماعی، کالبدی و فضایی از طریق بررسی ۳۳ شاخص بررسی شده است. نتایج بررسی نشان داد میزان برخورداری مناطق هشتگانه شهر اهواز به لحاظ شاخص‌های منتخب توسعه پایدار شهری متفاوت است؛ به طوری که از لحاظ برخورداری از شاخص اجتماعی منطقه ۴، شاخص خدمات شهری منطقه ۱ و از نظر شاخص خدمات شهری منطقه ۸ به‌عنوان محروم‌ترین مناطق از لحاظ برخورداری از شاخص‌های منتخب توسعه پایدار شهری مشخص شدند.
۷	۱۳۹۷	ایمانی و همکاران	واکاوی نقش شاخص‌های توسعه پایدار شهری در ساماندهی نواحی دچار افت شهر (مطالعه موردی: محله عالی‌قاپوی اردبیل)	در این پژوهش نویسنده به دنبال شناخت و تبیین مفاهیم و ارکان پایداری شهری و ردیابی آن‌ها در چارچوب احیای نواحی دچار افت شهری است. طبق نتایج به‌دست‌آمده مهم‌ترین راهکارهای دستیابی به توسعه پایدار در بافت فرسوده محله شیخ صفی (عالی‌قاپو) ازجمله برنامه‌ریزی‌های مشارکتی، عدالت اجتماعی و آموزش به ساکنان برای ارتقای سطح اجتماعی و نظایر آن می‌باشد.
۸	۱۳۹۵	سید علی حسینی و همکاران	تحلیل شاخص‌های شهر خلاق و ارتباط آن با توسعه پایدار شهری (نمونه موردی: شهر رشت)	موضوع پژوهش حاضر در مرحله اول ارزیابی شاخص‌های شهر خلاق در کلان‌شهر رشت هست و سپس ارتباط این شاخص‌ها با ابعاد توسعه پایدار شهری مورد سنجش قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که وضعیت شهر رشت بر اساس شاخص‌های شهر خلاق کمتر از میانگین مورد انتظار است. همچنین بین شاخص‌های شهر خلاق و ابعاد توسعه پایدار رابطه آماری مثبت و معناداری وجود دارد.
۹	۲۰۱۵	ویکتوریا پینونسلی <sup>۱</sup>	فرم شهر و پایداری	نتایج محقق، فرمی را پایدار می‌داند که بر پایه‌ریزی عملکردی مجموعه‌ای از سیستم شهری، استفاده پایدار از منابع، فراهم آوردن پایه‌های اقتصادی جهت ارتقاء کیفیت زندگی ساکنان استوار است. در نهایت با طرح این سؤال که زیرساخت‌های شهری را بتوان به سمت پراکنده روی گسترش داد اما هزینه بالای آن را چه کسانی متحمل می‌شود، اشاره می‌کند که برنامه‌ریزی باید در سطح محله‌ای و منطقه‌ای صورت گیرد تا اولویت‌های توسعه به‌درستی مشخص شود.
۱۰	۲۰۰۹	کیت ویلیامز <sup>۲</sup>	شهرهای پایدار: تحقیق و مطالعه چالش‌ها	در این مقاله نویسنده سعی کرده تا با بررسی چالش‌های موجود در راه رسیدن به شهرهای پایدار به راه‌حل‌های مناسبی با استفاده تجربیات خود و ارائه مدل‌های مختلف دست یابد.

<sup>1</sup> Victoria Pinoncely<sup>2</sup> Katie William



ظرفیت زمین برای تامین انسان‌ها متاثر از محدودیت‌های طبیعی و عوامل انسانی و در ارتباط با اقتصاد، محیط و فرهنگ است. در نتیجه ظرفیت قابل تحمل انسانی، متغیر، پویا و نامطمئن است. توسعه پایدار شهری، شکلی از توسعه است که می‌تواند توسعه مداوم شهرها و جوامع شهری نسل‌های آینده را تضمین کند [۳]. توسعه شهری از آغاز تاکنون تنها به مسائلی از قبیل گسترش فضای شهری، پذیرایی از جمعیت بیشتر، ایجاد کاربری‌های متعدد، بهره‌برداری بیشتر از منابع، تولید و مصرف بیشتر توجه نموده است، اما توسعه پایدار شهری تلاش می‌کند ناهنجاری‌ها و ناآرامی‌های ناشی از توسعه شهری را با ایده‌های جدید کاهش و به ایجاد برابری در شهر کمک کند. همچنین الگوی پایدار حمل و نقل را پیاده سازد، به فضای سبز و حفاظت و گسترش آن بهای بیشتری دهد، مردم را به استفاده بیشتر از دوچرخه و پیاده‌روی توصیه کند. امروزه عناصر تشکیل‌دهنده شهر با بدترین شرایط ممکن در طول تاریخ مواجه گشته‌اند [۴]. علاوه بر این پایداری شهری این سؤال را مورد توجه قرار می‌دهد که چه طور توسعه علوم و دستگاه‌های شهری، اطمینان مشروط به توسعه برای نسل آینده را حاصل می‌نمایند [۵]. توسعه پایدار شهری، یعنی شرایطی که شهرنشینان امروز و شهروندان فردا بتوانند در آن در کمال آرامش و امنیت زندگی کنند و ضمن تندرستی، از عمر دراز و در عین حال سازنده بهره‌مند گردند. از طرف دیگر، نظریه توسعه پایدار شهری، مسائلی مانند جلوگیری از آلودگی‌های محیط شهری و ناحیه‌ای، جلوگیری از کاهش ظرفیت‌های تولید محیط محلی، ناحیه‌ای و ملی، عدم حمایت از توسعه‌های زیان‌آور و برطرف

ساختن شکاف میان فقیر و غنی را مطرح می‌کند [۶]. از نظر کالبدی، توسعه پایدار شهری یعنی تغییراتی که در کاربری زمین و سطوح تراکم به‌منظور رفع نیازهای ساکنان شهر در زمینه مسکن، حمل و نقل، اوقات فراغت و غذا به عمل می‌آید تا در طول زمان، شهر را از نظر زیست‌محیطی، قابل سکونت و زندگی، از نظر اقتصادی بادوام و از نظر اجتماعی همبسته و هماهنگ نگه دارد [۷]. در توسعه پایدار شهری بایستی روابط منطقی میان محیط، عوامل اقتصادی و اجتماعی به‌خوبی رعایت گردد. به قول مومان مونسینگ<sup>۳</sup>، در گرو ارتباط متقابل و تنگاتنگ سه عامل محیطی، اقتصادی و اجتماعی است که یک شهر پایدار ایجاد می‌شود. به‌طورکلی، از مهم‌ترین مسائل در طراحی و احداث شهرهای آینده، علاوه بر برخورداری از مزیت تمرکز شهری، وجود یک سیستم منسجم، منظم و یکپارچه برای ارائه خدمات‌دهی مناسب به شهروندان است که از این طریق بتوان در جهت کاهش شرایط توسعه ناپایدار شهری گام برداشت و آن را به حداقل ممکن کاهش داد [۸]، زیرا رشد افقی و لجام‌گسیخته شهرها در طی سالیان اخیر یکی از معضلات شهری بوده و این امر باعث به وجود آمدن محیطی نامناسب برای شهروندان و ساکنان شهرها شده است. پراکندگی شهری و ساخت‌وسازهای جدید در اطراف شهر باعث آسیب‌های اجتماعی-اقتصادی و تخریب منابع زیست‌محیطی در شهرها و اطراف آن‌ها شده است. با توجه به تأثیر اساسی شکل شهر بر پایداری آن لزوم شناخت، مطالعه و درک ابعاد مختلف آن و هدایت آن در راستای دستیابی به توسعه پایدار احساس می‌شود [۹]. در فرایند شهرنشینی پایدار، اصول و رهیافت‌های

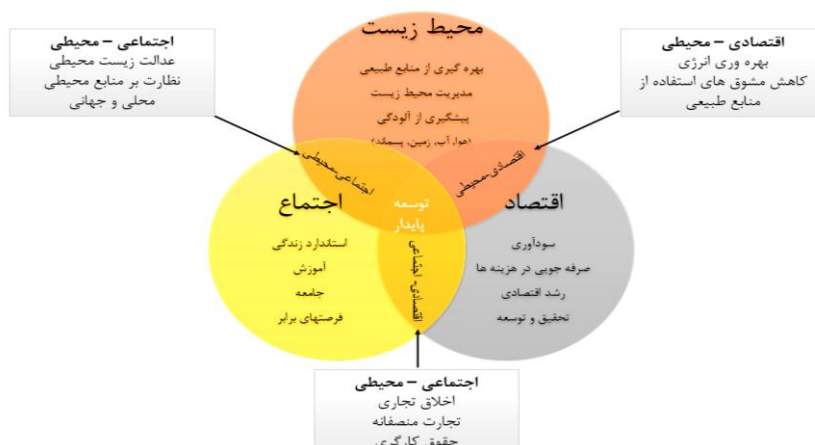
<sup>3</sup> Munasing Muhan

سهولت بیش‌تری قابل‌شناسایی خواهند بود. اهداف اجتماعی شامل دستیابی به برابری و حفظ تنوع فرهنگی، ارتقای نقش خانواده، افزایش حس جمعی و شهروندی، دستیابی به کیفیت و بهتر کردن کیفیت زندگی است. اهداف اقتصادی مشتمل بر اهداف کلی و هر نوع تغییر در فعالیت‌های اقتصادی خواهد بود که موجب ارتقای کیفیت زندگی شود. این موارد شامل ایجاد اقتصاد محلی پایدار است که زندگی مردم را بهتر می‌کند و شرایط کاری را بهبود می‌بخشد. به همین ترتیب اهداف زیست‌محیطی نیازمند ارتقای ظرفیت به‌منظور بهبود بخشی به کیفیت زندگی اجتماعات انسانی هستند. کاهش آلودگی، زندگی سالم را ارتقا می‌دهد و حفظ محیط طبیعی برای همه لذت‌بخش است و بر کیفیت زندگی می‌افزاید. این بدین معنی است که حتی اگر حفاظت از محیط مفهوم اصلی نباشد، هدف زیست‌محیطی نقش مهمی را در پایدار کردن محیط‌زیست و ارتقای کیفیت زندگی ایفا می‌کند [۶]. بهره‌وری از مفاهیم علم اقتصاد و مدیریت است که چنین تعریف می‌شود: مقدار کالا و یا خدمات تولید شده در مقایسه با هر واحد از انرژی و یا کار هزینه شده بدون کاهش کیفیت یا به شکل اثربخشی به همراه کارایی. به عبارت دیگر بهره‌وری عبارت است از به دست آوردن حداکثر سود ممکن به منظور ارتقاء رفاه جامعه با بهره‌گیری و استفاده بهینه از نیروی کار، توان، استعداد و مهارت نیروی انسانی، زمین، ماشین، پول، تجهیزات، زمان و مکان. بهره‌وری به نسبت کار انجام شده به کاری که باید انجام می‌شده، اطلاق می‌شود. می‌توان گفت برای نخستین بار لغت «بهره‌وری» توسط فردی به نام «کوئیزی» در سال ۱۷۷۶ بکار برده شد. بیش از یک قرن بعد یعنی

توسعه پایدار را به‌عنوان اصلی در مطالعات توسعه شهرها پیشنهاد می‌کنند که توجه به برابری و مساوات در رشد اقتصادی، عدالت اجتماعی و حقوق شهروندی، دسترسی مناسب به خدمات و نیازهای اساسی و ارتقای آگاهی نسبت به محیط‌زیست حرکتی مناسب به‌سوی کارایی بیش‌تر در استفاده از منابع، محیط‌زیست و عدالت اجتماعی خواهد بود که شهرها را به‌سوی پایداری سوق خواهد داد [۱۰]. مشخصات کلیدی پایداری شهری که غالباً در ادبیات موضوع و اسناد بیان می‌شوند عبارت‌اند از: برابری درون نسل‌ها، برابری بین نسل‌ها، حفاظت از محیط طبیعی، استفاده حداقل از منابع تجدید نشدنی، بقای اقتصادی و تنوع، جامعه خوداتکا، رفاه فردی و رفع نیازهای اساسی افراد جامعه. به‌علاوه، توسعه پایدار شهری شکلی از توسعه است که توان توسعه مداوم شهرها و جوامع شهری نسل‌های آینده را تأمین می‌کند [۱۱]. از نظر کالبدی، تغییراتی در کاربری زمین و سطوح تراکم برای رفع نیازهای ساکنان شهر در زمینه مسکن، حمل و نقل، اوقات فراغت به وجود می‌آورد تا در طول زمان شهر را از نظر زیست‌محیطی قابل سکونت، از نظر اقتصادی بادوام و از نظر اجتماعی همبسته نگه دارد [۱۲]. توسعه شهری، به‌عنوان مفهوم فضایی، زمانی دارای توسعه پایدار خواهد بود که شهروندان بتوانند درآمدی عادلانه، مسکنی مناسب، و زندگی سالم و راحتی داشته باشند [۱۳-۴]. مفهوم پایداری توسعه شامل چندین بعد است: پایداری اکوسیستم محیط‌زیست، پایداری منابع طبیعی، پایداری توسعه اقتصادی و پایداری رفاه انسانی. در هر صورت اگر مفهوم اصلی پایداری عبارت از پایدار کردن کیفیت زندگی مردم باشد، اهداف اجتماعی و اقتصادی با

در سال ۱۸۳۳ فردی به اسم لیتر، بهره‌وری را «قدرت و توانایی تولید کردن» تعریف کرد. بایستی توجه داشت که واژه بهره‌وری با گسترش انقلاب صنعتی و جهت افزایش سودمندی حاصل از نیروی کار، سرمایه و مواردی از این دست گسترش یافت ولی اصطلاح بهره‌وری آب در چندساله اخیر و به دلیل کمبود این ماده ارزشمند گسترش یافته است. توسعه پایدار شهری را می‌توان بهره‌وری در استفاده بهینه از زمین و تشویق بر بهره‌گیری مجدد از ساختمان‌ها دانست که امکان عدالت گسترده اجتماعی، در بستر فضا و برابری اجتماعی را محقق می‌گرداند و با فراهم نمودن امکانات رفاهی، اجتماعی، خدمات شهری و حقوق شهروندی، بهبود کیفیت زیست‌محیطی شهری و رضایت شهروندی را میسر می‌سازد. بر این اساس شهرسازی باید به‌عنوان ابزاری مؤثر برای اجرا و تحقق سیاست‌های ملی و محلی، فرصت‌هایی مطلوب را برای استفاده بهینه از منابع انرژی زمین و محیط‌زیست در ساختار شهری ارائه کند تا به ایجاد سکونت‌گاهی امکان دهد که نه تنها زندگی مطلوب و

شایسته برای نسل حاضر بلکه نسل‌های آینده را نیز فراهم می‌کند و همچنین پایداری کره زمین و روح انسانی را نیز تضمین می‌نماید. حقیقت این است که نمی‌توان شهر پایدار را با دقت و وضوح تصویر کرد و در نتیجه راهکارهای دستیابی به آن را مشخص ساخت، زیرا از یک سو، مقوله پایداری از مقیاس جهانی تا مقیاس محلی است و از سوی دیگر، هنوز بر سر پیامدهای بسیاری از اقدامات و فرایندهای توسعه، نظریات متناقضی وجود دارد، بنابراین شهر پایدار نه به شیوه‌های اقتدارگرایانه و از بالا، بلکه به‌گونه‌ای مردم‌سالارانه و از پایین ساخته شود. نگرش توسعه پایدار بر این اندیشه است که فن‌آوری نمی‌تواند هرگونه کاهش منابع طبیعی را جبران سازد و سرمایه طبیعی مکمل سرمایه انسان ساخت است و در این راستا سازمان ملل از مبانی و دیدگاه مفهومی توسعه پایدار حمایت می‌کند و راه دستیابی به توسعه پایدار را وجود بسترهای فرهنگی مناسب می‌داند که با آموزش و آگاهی دادن به مردم می‌توان به آن دست یافت [۷].



نمودار ۱: نمودار کلی شاخص‌های توسعه پایدار

## محدوده مورد مطالعه

شهر تبریز یکی از کلان‌شهرهای تاریخی کشورمان محسوب می‌شود که از نظر تقسیمات شهری به ۱۰ منطقه تقسیم می‌شود. منطقه ۲ تقریباً دارای بافت جدید و توسعه‌یافته بوده که امکانات مختلفی را دارا است این در حالی است که روند رشد جمعیت در مناطقی از شهر که قبلاً روستا بوده و سپس به شهر پیوسته‌اند مانند منطقه ۶ دارای رشد کاهنده‌ای بوده است، فرسودگی بافت مناطق قدیمی و روستایی، آلودگی‌های زیست‌محیطی و شهری بیش‌ترین جلوه را در این منطقه دارند، زیرساخت‌ها و خدمات شهری امروزی پوشش مناسب را در این مناطق ندارند. همه این عوامل باعث کاهش ارزش‌های هنوز باقی‌مانده و میزان شاخص‌های پایداری شهری و محله‌ای در این مناطق شده است.

منطقه ۲ شهر تبریز به وسعت ۲۰۸۰ هکتار (۳۵/۸ درصد از کل وسعت شهر) در جنوب شرق شهر و در دامنه‌های پایینی کوه سهند و در تراز ارتفاعی ۱۴۳۰ تا ۱۶۲۰ متر گسترش یافته است. جمعیت این منطقه طبق آخرین سرشماری ۱۶۹۰۴۷ نفر برآورد شد محله‌های این منطقه عبارتند از: زعفرانیه، ائل‌گلی، یاغچیان، آبرسان، ولیعصر جنوبی، مخابرات، حافظ، بزرگمهر، میرداماد، دادگستری، کوی فردوس، شهید رجایی، پرواز، گلشهر، ویلاشهر، بهارستان، شمس‌آباد. طیف ارتفاع ۱۵۵۰ تا ۱۶۰۰ متر، با وسعتی در حدود ۷۸۶/۶ هکتار بیش‌ترین وسعت را در این منطقه دارد به طوری که ۳۷ درصد از کل مساحت منطقه را در برمی‌گیرد. گروه اراضی نیمه هموار که سطوح شیب ۵ تا ۱۵ درصد را شامل می‌شوند. با مساحتی برابر ۸۵۵/۶ هکتار در حدود ۸/۴۰ درصد از

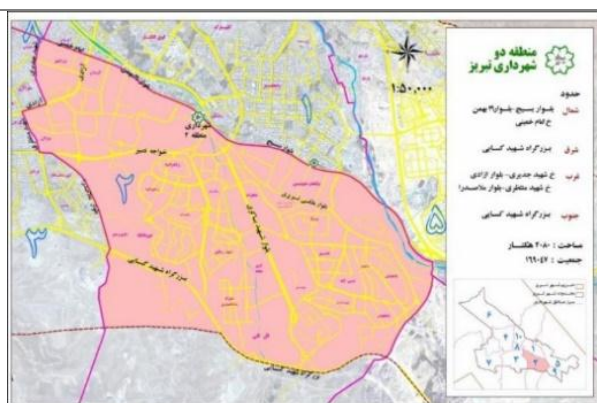
کل مساحت این منطقه را شامل شده است. به این ترتیب ۱۱/۸ درصد از کل اراضی نیمه هموار شهر تبریز در این منطقه گسترش دارد. اراضی هموار با ۷۳۷/۴ هکتار وسعت ۳۵ درصد از مساحت منطقه را در بر گرفته که ۳/۵ درصد از کل اراضی هموار در شهر تبریز است. مهم‌ترین ویژگی اراضی هموار در این منطقه گسترش قابل توجه آن‌ها در طیف ارتفاع ۱۵۰۰ تا ۱۶۰۰ متری است. به طوری که نزدیک به ۶۰ درصد از کل اراضی هموار منطقه در طیف ارتفاعی مزبور قرار دارند. سیمای مورفولوژی یال - دره که تناوب نسبتاً منظمی از پشته‌ها و میاناب‌های پرشیب با دره‌ها و شبکه‌های آبراه‌های است.

منطقه ۶ شهر تبریز به وسعت ۷۳۱۸ هکتار بزرگ‌ترین و وسیع‌ترین منطقه شهر تبریز است که حدود ۳۰ درصد از کل مساحت شهر را شامل شده است. جمعیت این منطقه طبق آخرین سرشماری ۹۴۸۹۷ نفر برآورد شد. محله‌های این منطقه عبارتند از: شهرک شهید صیاد شیرازی، آنا خاتون، شنب‌غازان، قره‌لر باغی، الوار علیا، قراملک، خانه‌های سازمانی نیروی هوایی، شهرک امام خمینی، خطیب، شهرک راه‌آهن. گسترش جغرافیایی آن در جهات غرب و شمال غرب شهر تبریز بسیاری از حوزه‌های هموار دشتی و نیز دشت‌های دامنه‌ای و کوهپایه‌های شمالی شهر و نیز دره رودخانه آجی‌چای را شامل می‌شود. علیرغم وسعت زیاد، اختلاف ارتفاع در این منطقه به نسبت نواحی شرقی شهر کم‌تر است. به طوری که حداقل ارتفاع آن در بستر رودخانه آجی‌چای و مهران‌رود در ۱۳۳۷ متر و حداکثر ارتفاع آن در شمال غرب منطقه و در ارتفاع ۱۴۷۷ متری قرار دارد. به این ترتیب اختلاف ارتفاعی حدود ۱۴۰ متر

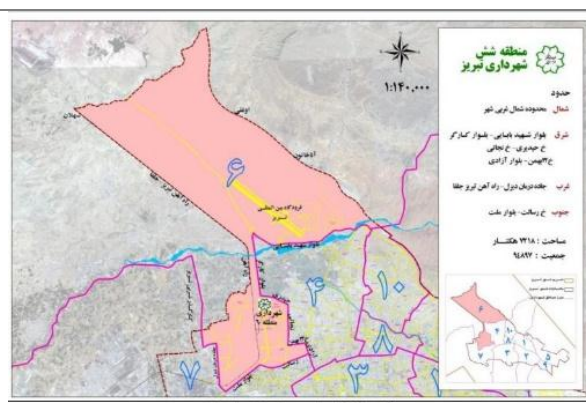
بین پست‌ترین تا بلندترین نقاط این منطقه مشاهده می‌شود. قسمت‌های وسیعی از این منطقه را اراضی هموار و کم شیب و بدون محدودیت‌های جغرافیایی در بر گرفته است. به طوری که ۵۹۷۵/۶ هکتار از مساحت منطقه که ۸۲/۵ درصد از کل مساحت آن است در گروه اراضی هموار و با شیب کمتر از ۵ درصد است. اراضی ناهموار و کاملاً ناهموار در این منطقه وسعت چندانی نداشته به طوری که وسعت اراضی ناهموار ۱۷۹/۶ هکتار، برابر ۲/۵ درصد از مساحت منطقه و حدود ۵ درصد از کل اراضی

ناهموار در شهر تبریز است. در این مقاله به بررسی و تحلیل و ارزیابی پایداری منطقه ۲ و منطقه ۶ شهر تبریز از لحاظ شاخص‌های توسعه پایدار شهری و مقایسه تطبیقی آن‌ها پرداخته شده است همچنین این پژوهش شامل مطالعه ابعاد مختلف توسعه پایدار شهری در دو منطقه نسبتاً متفاوت از لحاظ توسعه شهری است. با توجه به آنچه گفته شد بررسی و تحلیل شاخص‌های پایداری شهری در این دو منطقه و مطالعه تطبیقی آن‌ها یکی از ضرورت‌ها محسوب می‌شود.

منطقه ۲ شهر تبریز



منطقه ۶ شهر تبریز



شکل (۱): محدوده مورد مطالعه مناطق ۲ و ۶ تبریز

### روش تحقیق

شیوه پژوهش، کمی و از نوع پیمایشی است. جامعه آماری شامل اساتید و متخصصان دانشگاهی، کارشناسان شهرداری مناطق ۲ و ۶ و ساکنان دو منطقه مذکور است. روایی مورد اندازه‌گیری در این پژوهش روایی محتوایی است که برای تعیین آن از قضاوت متخصصان در این باره که سؤال‌های آزمون تا چه اندازه معرف محتوا و هدف‌های پژوهش هستند، استفاده شده است. برای بررسی روایی محتوایی

پرسشنامه از شاخص لاوشه یا CVI استفاده شده است. ابتدا ۱۰ پرسشنامه بین متخصصان (اساتید مربوطه) توزیع شده و از آن‌ها درخواست شد تا هر آیتم را بر اساس طیف سه‌قسمتی ضروری است، مفید است ولی ضرورتی ندارد و ضرورتی ندارد بررسی نمایند. بر اساس تعداد پاسخ‌دهنده حداقل مقدار روایی هر سؤال باید ۰/۶۲ باشد که سوالاتی که دارای روایی لازم بودند (۲۵ سؤال) حفظ و بقیه (۴ سؤال) حذف شدند. در نهایت پس از بررسی

پرسشنامه‌های مقدماتی و پاسخ‌های سؤال‌های تشریحی تعداد سؤال‌های پرسشنامه اصلی به ۲۵ سؤال اصلاح گردید و بین ۳۰ نفر ساکنان منطقه ۲، ۳۰ نفر ساکنان منطقه ۶ شهر تبریز، ۱۰ نفر کارشناسان شهرداری منطقه ۲، ۱۰ نفر کارشناسان منطقه ۶ و ۱۰ نفر اساتید دانشگاه توزیع گردید. برای تحلیل پرسشنامه از برنامه SPSS استفاده شده است. برای بررسی پایایی پرسشنامه از ضریب آلفای کرونباخ استفاده شد. مقدار ضریب الفای کرونباخ ۰/۸۳ به دست آمد که نشان‌دهنده این مطلب است که پرسشنامه از پایایی قابل قبولی برخوردار است (زیرا ضریب پایایی بیش‌تر از ۰/۷ است)، مقدار ضریب الفای کرونباخ به تفکیک شاخص‌های پژوهش به ترتیب، برای شاخص اجتماعی ۰/۸۷، شاخص محیطی ۰/۸۵ و شاخص اقتصادی ۰/۸۸ است (جدول ۲).

### یافته‌های توصیفی

برای بررسی نرمال بودن توزیع تغییرات از آزمون کلموگراف - اسمیرنوف استفاده شده است. با توجه به سطح معنی‌داری کل به دست آمده نتیجه گرفته می‌شود که مؤلفه‌ها دارای توزیع نرمال می‌باشند (سطح معنی‌داری  $< 0/05$ ). پس برای تحلیل داده‌ها از آزمون‌های پارامتریک استفاده شده است (جدول ۳).

جدول (۳): نتایج آزمون کولموگروف-اسمیرنوف برای بررسی نرمال بودن توزیع مؤلفه‌ها

عنوان شاخص‌ها	تعداد	آماره Z کولموگروف - اسمیرنوف	سطح معنی داری
اجتماعی	۹۰	۰/۷	۰/۷۱
محیطی	۹۰	۱/۱۵	۰/۱۴
اقتصادی	۹۰	۰/۹۷	۰/۲۹
کل	۹۰	۱/۰۲	۰/۲۴

شاخص‌های میانگین توصیفی چهار مؤلفه اصلی مورد بررسی در بین ۹۰ نفر به ترتیب، مؤلفه اجتماعی در بازه ۵-۲۷ دارای میانگین ۲۷/۶، انحراف معیار یا پراکندگی داده‌ها در اطراف میانگین ۶/۲۴ است که نشان‌دهنده پراکندگی کم داده‌ها است. حداقل نمره این بعد ۱۷ و حداکثر نمرگان ۴۰، برای توزیع کاملاً متقارن چولگی باید صفر باشد، در این

جدول (۲): مقدار ضریب آلفای کرونباخ کل برای پرسشنامه

آماره‌های مربوط به قابلیت اعتماد (پایایی)		
شاخص‌ها	تعداد سؤالات	ضریب آلفای کرونباخ
کل شاخص‌ها	۲۵	۰/۸۳
اجتماعی	۹	۰/۸۷
محیطی	۹	۰/۸۵
اقتصادی	۷	۰/۸۸

بهترین و مناسب‌ترین روش نمره‌گذاری پرسشنامه استفاده از مدل ساده لیکرت که به ترتیب ۱ = خیلی کم، ۲ = کم، ۳ = متوسط، ۴ = زیاد، ۵ = خیلی زیاد است. برای بررسی نرمال بودن توزیع متغیرها از آزمون کلموگراف - اسمیرنوف استفاده شده است. برای بررسی کلی سؤالات از طیف لیکرت استفاده شده است که در سه بازه ضعیف (۵-۲۴)، متوسط

کشیدگی آن ۰/۷۷- است و در بازه ۲، ۲- قرار دارد، این نشان می‌دهد توزیع متغیر از کشیدگی نرمال برخوردار است. مؤلفه اقتصادی در بازه ۲۲-۵ دارای میانگین ۱۶/۱، انحراف معیار یا پراکندگی داده‌ها در اطراف میانگین ۴/۷۳ است که نشان‌دهنده پراکندگی کم داده‌ها است. حداقل نمره این بعد ۷ و حداکثر نمره آن ۲۷، برای توزیع کاملاً متقارن چولگی باید صفر باشد، در این مؤلفه مقدار چولگی برابر ۰/۲۶ است و در بازه ۲، ۲- قرار دارد، یعنی از لحاظ کجی مؤلفه مورد نظر نرمال بوده و توزیع آن متقارن است. مقدار کشیدگی آن ۰/۲۴- است و در بازه ۲، ۲- قرار دارد، این نشان می‌دهد توزیع متغیر از کشیدگی نرمال برخوردار است (جدول ۴).

مؤلفه مقدار چولگی برابر ۰/۲۵ است و در بازه ۲، ۲- قرار دارد، یعنی از لحاظ کجی مؤلفه مورد نظر نرمال بوده و توزیع آن متقارن است. مقدار کشیدگی آن ۰/۷- است و در بازه ۲، ۲- قرار دارد، این نشان می‌دهد توزیع متغیر از کشیدگی نرمال برخوردار است. مؤلفه محیطی در بازه ۲۷-۵ دارای میانگین ۲۲/۷، انحراف معیار یا پراکندگی داده‌ها در اطراف میانگین ۵/۷۴ است که نشان‌دهنده پراکندگی کم داده‌ها است. حداقل نمره این بعد ۱۱ و حداکثر نمره آن ۳۶، برای توزیع کاملاً متقارن چولگی باید صفر باشد، در این مؤلفه مقدار چولگی برابر ۰/۲۷ است و در بازه ۲، ۲- قرار دارد، یعنی از لحاظ کجی مؤلفه مورد نظر نرمال بوده و توزیع آن متقارن است. مقدار

جدول (۴): شاخص‌های توصیفی مؤلفه‌های مورد بررسی

عنوان مؤلفه‌ها	تعداد	میانگین	انحراف معیار	مینیمم	ماکزیمم	کجی	کشیدگی
اجتماعی	۹۰	۲۷/۶	۶/۲۴	۱۷	۴۰	۰/۲۵	-۰/۷
محیطی	۹۰	۲۲/۷	۵/۷۴	۱۱	۳۶	۰/۲۷	-۰/۷۷
اقتصادی	۹۰	۱۶/۱	۴/۷۳	۷	۲۷	۰/۲۶	-۰/۲۴

### یافته‌های استنباطی

برای پاسخ به سؤال اول، یعنی وضعیت پایداری از لحاظ بعد اجتماعی در دو منطقه ۲ و ۶ به چه شکل است؟ از آزمون آنالیز واریانس استفاده شده است. بررسی با ۹ گوی یا سنج، نشان می‌دهد که با ۹-۴۵ امتیاز، در سه طیف ضعیف ۲۱-۹، متوسط ۳۳-۲۲ و خوب ۴۵-۳۴، رتبه‌بندی گردید. وضعیت پایداری از لحاظ بعد اجتماعی، در منطقه ۲، ۱۵/۵۵٪ ضعیف، ۵۷/۷۷٪ متوسط و ۲۶/۶۶٪ خوب و در منطقه ۶، ۱۷/۷۷٪ ضعیف، ۷۷/۷۷٪ متوسط و ۴/۴۴٪ خوب ارزیابی گردید. از لحاظ تک‌تک گویه‌ها، کیفیت اجرای برنامه‌های بازیافت زباله در منطقه ۲ و منطقه

۶ به ترتیب، ۶۸/۴٪ و ۶۰/۴٪ است. دسترسی به مسیرهای دوچرخه‌سواری و پیاده‌روی نیز، در منطقه ۲ و منطقه ۶ به ترتیب، ۷۰/۲٪ و ۵۲/۸٪ هست و همچنین کیفیت فضاهای عمومی مانند پارک، فضای سبز، میدان و ...، در منطقه ۲ و منطقه ۶ به ترتیب، ۶۶/۶٪ و ۶۱/۶٪ است. کیفیت شبکه ایمنی پیاده‌راه‌ها و مسیرهای دوچرخه، نیز در منطقه ۲ و منطقه ۶ به ترتیب، ۶۷٪ و ۵۲٪ است. از لحاظ کیفیت اجرای برنامه‌هایی جهت کاهش پسماند، در منطقه ۲، ۶۳٪ و در منطقه ۶، ۵۱٪ و کیفیت دسترسی به خدمات بهداشتی و پزشکی، در منطقه ۲، ۶۷٪ و در منطقه ۶، ۶۸/۸٪ است. کیفیت دسترسی به محیط‌های آموزشی

مانند مدرسه، آموزشگاه و دانشگاه و ... نیز، به ترتیب در منطقه ۲، ۶۸/۸٪ و در منطقه ۶، ۶۱/۲٪ است. کیفیت دسترسی به مکان‌های اجتماعی مانند کافی‌شاپ و رستوران نیز در منطقه ۲، ۶۹/۴٪ و در منطقه ۶، ۶۰/۴٪ هست و در نهایت از نظر کیفیت کنترل ازدحام و مشکل ترافیک، در منطقه ۲، ۴۴٪ و

در منطقه ۶، ۵۱/۴٪ است. در کل کیفیت تمامی گویه‌ها، در منطقه ۲ بهتر از منطقه ۶ است به جز موارد دسترسی به خدمات بهداشتی و کیفیت کنترل مشکل ترافیک (جدول ۵).

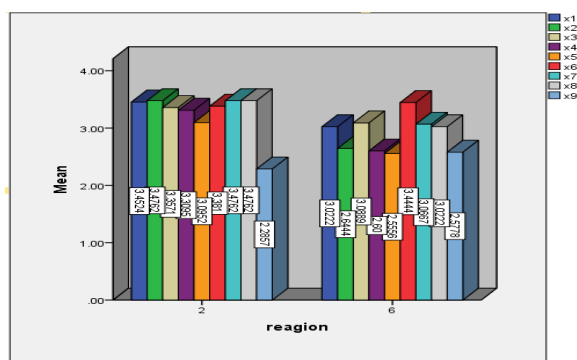
جدول (۵): نتایج آزمون واریانس برای مقایسه وضعیت پایداری از لحاظ بعد اجتماعی در دو منطقه ۲ و ۶

گویه	گروه	میانگین	انحراف معیار	سطح معنی‌داری درجه آزادی
X1	منطقه ۲	۳/۴۲	۰/۸۳	۰/۲
	منطقه ۶	۳/۰۲	۰/۷۵	
X2	منطقه ۲	۳/۵۱	۱/۰۱	۰/۰
	منطقه ۶	۲/۶۴	۰/۹۳	
X3	منطقه ۲	۳/۳۳	۰/۸۲	۰/۱۸
	منطقه ۶	۳/۰۸	۰/۹۲	
X4	منطقه ۲	۳/۳۵	۰/۸۵	۰/۰
	منطقه ۶	۲/۶	۰/۹۶	
X5	منطقه ۲	۳/۱۵	۰/۸۵	۰/۰۰۳
	منطقه ۶	۲/۵۵	۱/۰۳	
X6	منطقه ۲	۳/۳۵	۰/۹۸	۰/۶۲
	منطقه ۶	۳/۴۴	۰/۷۲	
X7	منطقه ۲	۳/۴۴	۱/۰۳	۰/۰۷
	منطقه ۶	۳/۰۶	۰/۹۱	
X8	منطقه ۲	۳/۴۷	۱/۲۳	۰/۰۴
	منطقه ۶	۳/۰۲	۰/۸۳	
X9	منطقه ۲	۲/۲	۱/۱۷	۰/۱۱
	منطقه ۶	۲/۵۷	۱/۰۷	

شکل (۲): مقایسه وضعیت پایداری از لحاظ بعد اجتماعی در

دو منطقه ۲ و ۶

برای پاسخ به سؤال دوم، یعنی وضعیت پایداری از لحاظ بعد محیطی در دو منطقه ۲ و ۶ به چه شکل است؟ از آزمون آنالیز واریانس استفاده شده است. بررسی با ۹ گویه یا سنج، نشان می‌دهد که با ۹-۴۵ امتیاز، در سه طیف ضعیف ۲۱-۹، متوسط ۲۲-۳۳ و خوب ۴۵-۳۴، رتبه‌بندی گردید. وضعیت پایداری





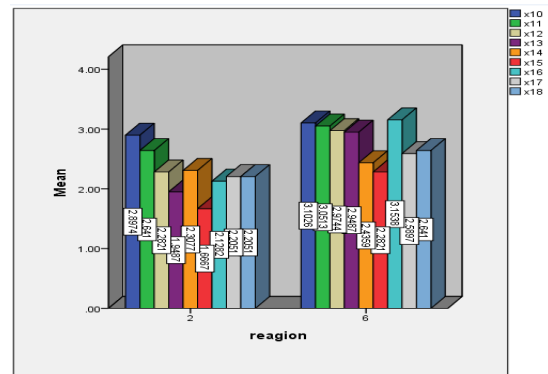
کیفیت اجرای پروژه‌هایی برای استفاده از منابع تجدید پذیر مانند انرژی خورشیدی یا بادی در منطقه ۲، ۳۱/۴٪ و در منطقه ۶، ۴۳/۴٪ هست و نیز کیفیت اجرای برنامه‌هایی جهت حفظ و توسعه فضای سبز و پارک در منطقه ۲، ۴۰/۸٪ و در منطقه ۶، ۶۲/۸٪ است. کیفیت استفاده از فناوری‌های مدرن و هوشمند در حمل و نقل عمومی در منطقه ۲، ۴۰/۸٪ و در منطقه ۶، ۵۱/۴٪ است و در جهت پاسخ فضاهای عمومی به‌طور مستقیم به نیاز ساکنان و بازدیدکنندگان، ۴۲/۲٪ و در منطقه ۶، ۵۳/۲٪ است که در کل کیفیت دسترسی به فضاهای عمومی، کیفیت اجرای برنامه‌هایی برای حفظ محیط‌زیست و میزان پاسخ‌دهی فضاهای عمومی به نیاز ساکنان، در منطقه ۲، پایین‌تر است (جدول ۶).

از لحاظ بعد اجتماعی، در منطقه ۲، ۴۴/۴٪ ضعیف، ۵۵/۵٪ متوسط و ۰٪ خوب و در منطقه ۶، ۳۳/۳٪ ضعیف، ۶۶/۶٪ متوسط و ۰٪ خوب ارزیابی گردید. از لحاظ تک‌تک گویه‌ها، امکانات و فضا برای فعالیت بدنی و سلامتی مانند باشگاه و پارک‌های ورزشی، در منطقه ۲، ۵۸/۲٪ و در منطقه ۶، ۶۱/۸٪ است و کیفیت دسترسی به حمل‌ونقل عمومی مانند اتوبوس، مترو و تاکسی، در منطقه ۲، ۵۱٪ و در منطقه ۶، ۶۲/۲٪ هست. کیفیت اجرای برنامه‌های شهرسازی برای حفظ محیط‌زیست و کاهش آلودگی هوا در منطقه ۲، ۴۳/۴٪ و در منطقه ۶، ۵۶/۸٪ است و کیفیت بازسازی و بازآفرینی بافت‌های فرسوده، در منطقه ۲، ۳۸/۸٪ و در منطقه ۶، ۵۱/۴٪ است. کیفیت اجرای برنامه‌هایی جهت کاهش تلفات آب و انرژی در منطقه ۲، ۴۸٪ و در منطقه ۶، ۴۶/۲٪ است و

جدول (۶): نتایج آزمون واریانس برای مقایسه وضعیت پایداری از لحاظ بعد محیطی در دو منطقه ۲ و ۶

گویه	گروه	میانگین	انحراف معیار	سطح معنی‌داری	درجه آزادی
X10	منطقه ۲	۲/۹۱	۰/۹۹	۰/۸۸	
	منطقه ۶	۳/۰۹	۱/۰۵		
X11	منطقه ۲	۲/۵۵	۰/۸۹	۰/۱۶	
	منطقه ۶	۳/۱۱	۱/۱۷		
X12	منطقه ۲	۲/۱۷	۰/۶۱	۰/۰۱	
	منطقه ۶	۲/۸۴	۱/۰۲		
X13	منطقه ۲	۱/۹۴	۰/۶	۰/۰۰۱	
	منطقه ۶	۲/۷۵	۰/۹۸		
X14	منطقه ۲	۲/۴	۰/۰۸	۰/۰۰	
	منطقه ۶	۲/۳۱	۰/۱۳		
X15	منطقه ۲	۱/۵۷	۰/۱۰	۰/۱۹	
	منطقه ۶	۲/۱۷	۰/۱۳		
X16	منطقه ۲	۲/۰۴	۰/۰۹	۰/۰۲	۱
	منطقه ۶	۳/۱۴	۰/۱۵		
X17	منطقه ۲	۲/۰۴	۰/۷۶	۰/۱۰	
	منطقه ۶	۲/۵۷	۰/۸۹		
X18	منطقه ۲	۲/۱۱	۰/۸۸	۰/۰۸	

منطقه ۶، ۳۱٪/۱۱ ضعیف، ۶۲٪/۲۲ متوسط و ۶٪/۶۶ خوب ارزیابی گردید. از لحاظ تک‌تک گویه‌ها، میزان اجرای برنامه‌های حمایتی در جهت رشد کسب و کارهای کوچک در هر دو منطقه کم و به ترتیب در منطقه ۲، ۵۱٪/۶ و در منطقه ۶، ۵۳٪/۲ است. از لحاظ کیفیت اجرای برنامه‌هایی برای توسعه اقتصادی پایدار در منطقه ۲، ۴۰٪/۴ و در منطقه ۶، ۵۱٪/۴ است و کیفیت اجرای برنامه‌هایی برای اشتغال‌زایی منطقه‌ای، در منطقه ۲، ۳۶٪/۸ و در منطقه ۶، ۵۰٪/۶ است. کیفیت فرصت شغلی با توجه به برابری جنسیتی، در منطقه ۲، ۳۵٪ و در منطقه ۶، ۵۲٪/۸ هست و میزان استفاده از منابع موجود برای ایجاد شغل پایدار و توسعه اقتصادی در منطقه ۲، ۳۶٪ و در منطقه ۶، ۵۲٪/۸ است.



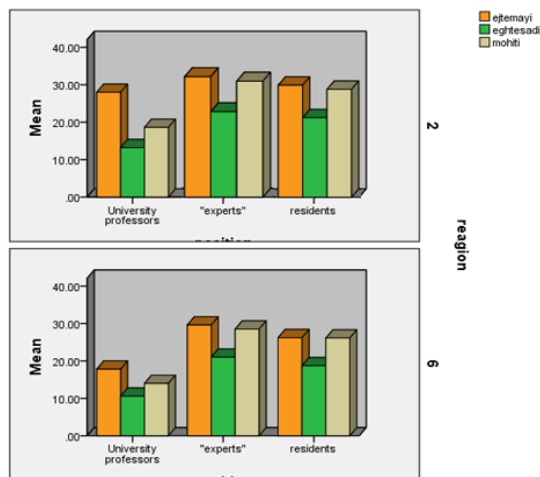
شکل (۳): مقایسه وضعیت پایداری از لحاظ بعد محیطی در دو منطقه ۲ و ۶

برای پاسخ به سؤال سوم، یعنی وضعیت پایداری از لحاظ بعد اقتصادی در دو منطقه ۲ و ۶ به چه شکل است؟ از آزمون آنالیز واریانس استفاده شده است. بررسی با ۷ گویه یا سنجه، نشان می‌دهد که با ۷-۳۴ امتیاز، در سه طیف ضعیف ۱۶-۷، متوسط ۲۵-۱۷ و خوب ۳۴-۲۶، رتبه‌بندی گردید. وضعیت پایداری از لحاظ بعد اقتصادی، در منطقه ۲، ۶۶٪/۶ ضعیف، ۱۵٪/۵۵ متوسط و ۱۷٪/۷۷ خوب و در

گویه	گویه	گروه	میانگین	انحراف معیار	سطح معنی‌داری	درجه آزادی
X19	میزان اجرای برنامه‌های حمایتی در جهت رشد کسب و کارهای کوچک	منطقه ۲	۲/۵۸	۰/۹۰	۰/۶۹	
	منطقه ۶	۲/۶۶	۰/۸۷			
X20	کیفیت اجرای برنامه‌هایی برای توسعه اقتصادی پایدار	منطقه ۲	۲/۰۲	۰/۶۹	۰/۰۰	
		منطقه ۶	۲/۷۵	۰/۹۳		
X21	کیفیت اجرای برنامه‌هایی برای اشتغال‌زایی	منطقه ۲	۱/۸۴	۰/۶۳	۰/۰۰	
		منطقه ۶	۲/۵۳	۰/۷۲		
X22	کیفیت فرصت شغلی با توجه به برابری جنسیتی	منطقه ۲	۱/۷۵	۰/۶۷	۰/۰۰	
		منطقه ۶	۲/۶۴	۰/۹۰		
X23	میزان استفاده از منابع موجود برای ایجاد شغل پایدار	منطقه ۲	۱/۸	۱/۸۰	۰/۰۰	
		منطقه ۶	۲/۶۴	۲/۶۴		
X24	میزان اجرای سیاست‌هایی جهت کاهش هدر رفتن منابع	منطقه ۲	۱/۸۸	۱/۸۸	۰/۰۰۱	
		منطقه ۶	۲/۴۲	۲/۴۲		
X25	کیفیت اجرای برنامه‌ها جهت جذب سرمایه‌گذار	منطقه ۲	۱/۴۸	۱/۴۸	۰/۰۰	

جدول (۷): نتایج آزمون واریانس برای مقایسه وضعیت پایداری از لحاظ بعد اقتصادی در دو منطقه ۲ و ۶

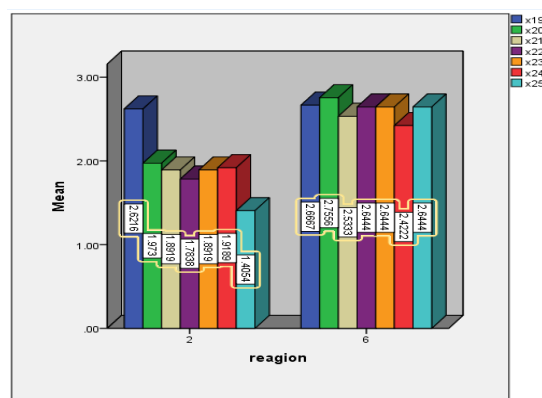
نظر ساکنان منطقه ۲ شهرداری شهر تبریز، پایداری شهری در منطقه ۲، از لحاظ بعد اجتماعی، ۷۱/۱۱٪، بعد اقتصادی، ۴۸/۸۸٪ و بعد محیطی ۶۶/۶۶٪ است. از نظر متخصصان و اساتید دانشگاه، پایداری شهری در منطقه ۶، از لحاظ بعد اجتماعی، ۴۰٪، بعد اقتصادی، ۲۶/۶۶٪ و بعد محیطی، ۳۱/۱۱٪ و از نظر کارشناسان منطقه ۶ شهرداری شهر تبریز، پایداری شهری در منطقه ۶، از لحاظ بعد اجتماعی، ۶۶/۶۰٪، بعد اقتصادی، ۵۵/۵۵٪ و بعد محیطی، ۶۴/۴۴٪ و از نظر ساکنان منطقه ۶ شهرداری شهر تبریز، پایداری شهری در منطقه ۶، از لحاظ بعد اجتماعی، ۶۰٪، بعد اقتصادی، ۵۱/۱۱٪ و بعد محیطی ۶۰٪ است (شکل ۵).



شکل (۵): مقایسه وضعیت پایداری از لحاظ سه بعد در دو منطقه ۲ و ۶

مقایسه وضعیت پایداری از لحاظ سه بعد در دو منطقه ۲ و ۶، از نظر کارشناسان دو منطقه، متخصصان و ساکنان دو منطقه در نهایت وضعیت پایداری در منطقه ۲ شهرداری شهر تبریز، از لحاظ بعد اجتماعی،

میزان استفاده از سیاست‌هایی جهت کاهش هدر رفتن منابع و انرژی در صنایع و کسب و کارها در منطقه ۲، ۳۷/۶٪ و در منطقه ۶، ۴۸/۴٪ است و در نهایت کیفیت اجرای برنامه‌ها جهت جذب سرمایه‌گذار و سرمایه‌های پایدار در منطقه ۲، ۷۴٪ و در منطقه ۶، ۵۲/۸٪ است. در کل در هر دو منطقه ۲ و منطقه ۶، وضعیت پایداری از لحاظ بعد اقتصادی، در سطح پایینی قرار دارد (جدول ۷).

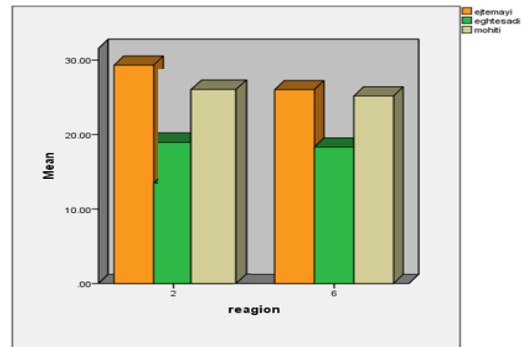


شکل (۶): مقایسه وضعیت پایداری از لحاظ بعد اقتصادی در دو منطقه ۲ و ۶

برای پاسخ به سؤال چهارم، یعنی مقایسه وضعیت پایداری از لحاظ سه بعد، از نظر کارشناسان دو منطقه و ساکنان دو منطقه و کارشناسان به چه شکل است؟ از نمودار فراوانی استفاده شده است. از نظر متخصصان و اساتید دانشگاه، پایداری شهری در منطقه ۲، از لحاظ بعد اجتماعی، ۶۴/۴۴٪، بعد اقتصادی، ۳۱/۱۱٪ و بعد محیطی، ۴۲/۲۲٪ و از نظر کارشناسان منطقه ۲ شهرداری شهر تبریز، پایداری شهری در منطقه ۲، از لحاظ بعد اجتماعی، ۷۳/۳۳٪، بعد اقتصادی، ۵۳/۳۳٪ و بعد محیطی، ۷۵/۵۵٪ و از

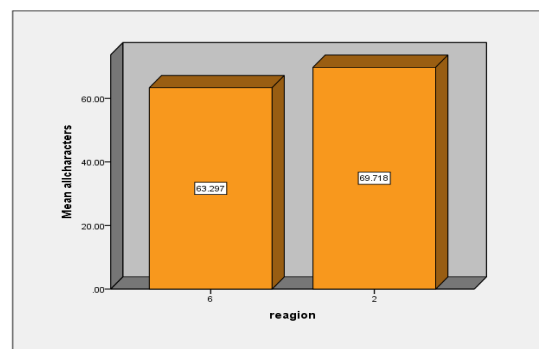
و آسیب رساندن به محیط زیست مشکلات زیادی برای موجودات به وجود آمده و چرخه زیستی را دچار آسیب‌های جدی کرده است. ابر شهرهای وسیع بی‌پایان در هر دو جهت عمودی و افقی در حال گسترش هستند، محیط‌های زندگی مترکم‌تر، رابطه متضادتری بین محیط شهری و محیط طبیعی به وجود آورده است. پایداری شهری به کلید آینده تمدن ما تبدیل شده است. با توجه به تمرکز مترکم جمعیت و فعالیت‌های صنعتی، کیفیت زندگی ساکنان شهرها در حال حاضر با چالش‌های مختلفی از جمله آلودگی هوا و صوتی، ازدحام ترافیک و استرس اجتماعی بسیار بیشتر از همتایان غیرشهری خود مواجه هستند. گسترش سریع شهری تقریباً همیشه با تأثیرات منفی بر پیوستگی اجتماعی شهر همراه است که اغلب منجر به فقدان برابری برای ساکنان شهری، به‌ویژه در مورد دسترسی به زیرساخت‌های شهری و سایر خدمات اساسی و نیز نابرابری درآمد می‌شود. با این وجود، رشد شهری مستمر اجتناب‌ناپذیر است. شهرنشینی به‌عنوان دومین انقلاب در فرهنگ انسان، باعث دگرگونی در روابط متقابل انسان‌ها با یکدیگر شده، با افزایش جمعیت شهرنشین، بهره‌برداری از محیط تشدید می‌شود. در چند دهه گذشته رشد شتابان شهرنشینی و گسترش فعالیت‌های صنعتی، زیرساخت‌های شهری را کاهش و ضایعات زیست‌محیطی را افزایش داده است. شهر تبریز یکی از کلان‌شهرهای تاریخی کشورمان محسوب می‌شود که از نظر تقسیمات شهری به ۱۰ منطقه تقسیم می‌شود. منطقه ۲ تقریباً دارای بافت جدید و توسعه‌یافته بوده و همچنین امکانات مختلفی را دارا هست این در حالی است که روند رشد جمعیت در مناطقی از شهر که قبلاً روستا بوده سپس به شهر

۶۴/۷۷٪، بعد اقتصادی، ۴۲/۲۲٪، بعد محیطی، ۵۷/۷۷٪ و وضعیت پایداری، در منطقه ۶ شهرداری شهر تبریز، از لحاظ بعد اجتماعی، ۵۷/۵۵٪، بعد اقتصادی، ۴۰٪، بعد محیطی، ۵۵/۵۵٪ است (شکل ۶).



شکل (۶): مقایسه وضعیت پایداری از لحاظ سه بعد در دو منطقه ۲ و ۶

مقایسه تطبیقی، وضعیت پایداری در دو منطقه ۲ و ۶، نشان می‌دهد، پایداری شهری در منطقه ۲، ۶۹/۷۱٪ و در منطقه ۶، ۶۳/۲۹٪ است که نشان‌دهنده این مطلب است که در کل پایداری شهری در منطقه ۲ بیش‌تر از منطقه ۶ است (شکل ۷).



شکل (۷): مقایسه وضعیت پایداری کلی در دو منطقه ۲ و ۶

### نتیجه‌گیری

امروزه اکثریت جمعیت جهان در شهرها زندگی می‌کنند، برخلاف سال ۱۹۵۰ که کم‌تر از ۳۰ درصد ساکنان شهر بودند؛ با توجه به افزایش و رشد جمعیت

افزایش مشکلات زیست‌محیطی، زیرساختی و اقتصادی، مدیریت شهری را با مشکلات عدیده‌ای روبرو کرده است؛ اما در کل ضرورت برنامه‌ریزی و آینده‌نگری در مناطق مختلف شهر تبریز با توجه به شرایط منحصربه‌فرد هر منطقه بایستی در برنامه‌ریزی فضاهای شهری با در نظر گرفتن رویکرد پایداری مورد توجه قرار گیرد.

### منابع

- [1] Zendieh, M., Parvardinejad, S., 2010, Sustainable development and its concept in housing architecture of Iran, Housing and Rural Environment, 29, 2. (in Persian)
- [2] Navabakhsh, M., Pourmosavi, S.M., Tajik, Z., 2013, Comparative survey on the sustainable social development indexes Tehran metropolis, case study: District 6 & 10, Applied Research in Geographical Sciences, 13, 179. (in Persian)
- [3] Ebrahimzadeh, I., Zare, M., 2014, Evaluation of social capital participation and urban sustainable development (Case study: District no.3 of Zahedan metropolis), Geography and Territorial Spatial Arrangement, 4, 15. (in Persian)
- [4] Bardi Anamoradnejad, R., Nikpour, A., Hosni, S.Z., 2018, The physical-spatial analysis of urban areas based on the indicators of the urban smart growth (A case study: Babol), Research and Urban Planning, 9, 19. (in Persian)
- [5] Meimandi Parizi, S., 2018, Assessment and comparative analysis level of sustainability in old and new urban neighborhoods (Case study: Old and new urban neighborhoods in Kerman), Quarterly Journal of Environmental Based Territorial Planning, 10, 77. (in Persian)
- [6] Maleki, L., Habibi, M., 2012, Evaluating the environmental quality in urban neighbourhoods (Case study: Chizar neighbourhood, Tehran), Journal of Architecture and Urban Planning, 4, 113. (in Persian)
- [7] Baghban S., Shokouhi, M.A., 2021, Applying a futuristic approach to understand the factors affecting sustainable urban development in Mashhad (Case study: districts 1 and 2), Journal of Physical Development Planning, 6, 25. (in Persian)
- [8] Mohammadi Sangli, Kh., Qorashi, S.S., 2016, Sustainable urban development, global approach with local solutions, case study: Investigation of sustainability criteria in the traditional architecture of Yazd city, Art And Architecture Studies, 4, 87. (in Persian)

پیوسته اند مانند منطقه ۶ دارای رشد کاهنده‌ای بوده است، فرسودگی بافت مناطق قدیمی و روستایی، آلودگی‌های زیست‌محیطی و شهری بیشترین جلوه را در این منطقه دارند، زیرساخت‌ها و خدمات شهری امروزی پوشش مناسب را در این مناطق ندارند. همه این عوامل باعث کاهش ارزش‌های باقی‌مانده و میزان شاخص‌های پایداری شهری و محله‌ای در این مناطق شده است. روش تحقیق به‌کار رفته در این پژوهش ابتدا توصیفی و تحلیلی بوده است که از طریق مطالعه کتابخانه‌ای انجام شده است. سپس روش جمع‌آوری داده‌ها متکی بر برداشت میدانی با استفاده از پرسشنامه بوده است. پرسشنامه مذکور در ۳ شاخص اجتماعی، اقتصادی و محیطی طراحی گردید. بعد از مراحل فوق اقدام به دسته‌بندی داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS نموده و میانگین هر شاخص را محاسبه، سپس با توجه به پاسخ افراد، میانگین پاسخ آن‌ها با میانگین نظری هر گویه از شاخص‌ها مقایسه گردید و در نهایت با آزمون t تک نمونه‌ای مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. با بررسی پرسشنامه‌ها و تحلیل‌های آماری نتایج به دست آمده نشان می‌دهد، وضعیت پایداری شهری در منطقه ۲، با ۱۰۵-۵ امتیاز، در سه طیف ضعیف ۳۸-۵، متوسط ۷۲-۳۹ و خوب ۱۰۵-۷۳، رتبه‌بندی گردید. وضعیت پایداری شهری، در منطقه ۲، ۰٪ ضعیف، ۵۷/۷۷٪ متوسط و ۴۲/۲۲٪ خوب و در منطقه ۶، ۱۱/۱۱٪ ضعیف، ۴۸/۸۸٪ متوسط و ۴۰٪ خوب ارزیابی گردید. کلان‌شهر تبریز نمونه‌ای از شهرهایی است که به‌رغم انسجام فضایی و فشردگی در مرحله پیدایش، در پی تحولات ناشی از شهرسازی دهه‌های اخیر به‌کلی متحول شده و امروزه سطح اشغال‌شده آن بر روند رشد جمعیت پیشی‌گرفته که این امر ضمن

- [9] Taher Tolou Del, M.S., Zare, M., Sadat, S.A., 2021, Study the Social Instability in Informal Settlements based on the Challenges of Sustainable Urban Development (Case Study: 2nd District in Tehran Farahzad Neighborhood), Journal of Geography and Environmental Studies, 38, 83. (in Persian)
- [10] Imani, B., Joudi Gollar, P., Heydarvand, M., 2019, Role of sustainable urban development indices in organizing the declined urban areas (Case study: Neighborhood Alighapoo Ardabil), Geographical Urban Planning Research, 6, 717. (in Persian)
- [11] Hosseini, S.A., Gholipoor, Y., Mozafari, A., 2018, The analysis of parameters of creative city and it's relationship with sustainable urban development (Case study: Rasht city), Journal of Iranian Architecture & Urbanism, 8, 209. (in Persian).
- [12] Taghvaei, M., Safarabadi, A., 2013, Urban sustainable development and selected variables affecting it (Case of study: The city of Kermanshah), Journal of Sociological Urban Studies, 3, 1. (in Persian).
- [13] Mouzarmi, S., Sarvar, R., Vali Shareeatpanahi, M., 2020, Evaluating sustainable urban development indexes along with emphasis on infill urban development: Case study of eight regions of Ahvaz, Human Geography Research, 52, 1319. (in Persian).
- [14] Sasanpour, F., Tavalaei, S., Jafari Asadabadi, H., 2014, Livability of cities in sustainable urban development (Case study: Tehran metropolis), Geography, 12, 129. (in Persian).
- [15] Aina, Y.A., Wafer, A., Ahmed, F., Alshuwaikhat, H.M., 2019, Top-down sustainable urban development? Urban governance transformation in Saudi Arabia, Cities, 90, 272.
- [16] Sajadi Naeini, M., 2005, History of Isfahan, Tuba half of the world, Isfahan Municipality Recreational - Cultural Publishing, 3, 87. (in Persian).
- [17] Mardiah, W.M.R.W.N., 2015, Compact urban form for sociability in urban neighbourhoods. International Journal of Social Science and Humanity, 5, 822.
- [18] Samaninejad, M.J., Pakar, M., Tavakoli Kashani, M., 2020, Clarifying the role of citizens participation in the sustainability of urban neighborhoods, (Case study: Kasha neighborhoods), 10<sup>th</sup> National Conference on Urban Planning, Architecture, Civil Engineering and Environment, Research Institute of Payashahr Atrak and Payashahr Scientific Journal, 21 September, Shirvan, Iran. (in Persian)

**“Research article”****Comparative comparison of the state of sustainable development in terms of social-environmental-economic dimensions****(Case Study: Municipal regions 2 and 6 of Tabriz)****Mostafa Ranjori Heravi, Saeedeh Feizi\***

Department of Architecture and Urban Planning, Azarshahr Branch, Islamic Azad University, Azarshahr, Iran

\*Corresponding author: sa.feizi@iau.ac.ir

(Received: 22 November 2023, Accepted: 6 May 2024)

**Abstract**

Sustainable development involves integrating social, environmental, and economic objectives to enhance human well-being while safeguarding the capacity of future generations to fulfill their requirements. The development of cities that are socially, environmentally, and economically stable, capable of addressing the challenges posed by rapid population growth and migration, stands as a central task in this century. Over the past few decades, the swift urbanization and expansion of industrial activities have led to a decline in urban infrastructure and an increase in environmental waste. The socio-environmental and economic dimensions of sustainable urban development serve as valuable tools for enhancing urban cohesion. Consequently, the study of sustainable development in Tabriz holds significant importance. In this study, we conducted a comparative analysis of the socio-environmental and economic dimensions of sustainable development in Tabriz city, focusing on regions 2 and 6. Our investigation involved reviewing relevant literature, conducting field observations, and administering questionnaires. The present study employed a descriptive and field-based research method. Data were collected through a questionnaire administered to various groups, including residents and experts from regions 2 and 6. The data analyses were conducted using SPSS software. The results indicated that urban sustainability in region 2 was assessed on a scale of 5 to 105 points, categorized into three ranges: poor (5-38), average (39-72), and good (73-105). In region 2, the evaluation of urban sustainability revealed the following distribution: 0% poor, 57.77% average, and 42.22% good. Meanwhile, in region 6, the distribution was 11.11% poor, 48.88% average, and 40% good. Notably, residents and experts expressed greater satisfaction with the sustainability of region 2 compared to that of region 6. Given that sustainable development is a crucial aspect of urban planning, it is essential to incorporate forward-looking strategies tailored to the unique conditions of each area within Tabriz city. This consideration should inform the planning of urban spaces, aligning with the principles of sustainable development.

**Conflict of interest:** None declared.**Keywords:** Sustainable development, Tabriz city, Social-environmental dimension, Urban spaces