



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

دوره ۱، شماره ۳، پیاپی ۳
پاییز ۱۴۰۳، صفحات ۲۸-۱

"مقاله مروری"

فناوری زیست پالایی: یک راهکار قابل اعتماد و سازگار با محیط زیست برای احیای

محیط‌های آلوده

محمد صفری^۱، نسیم موسی خانی^۲، احمد اصل هاشمی^۳، غلامحسین صفری^{۴*}

۱. دانشکده پزشکی، واحد کرمان، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمان، ایران

۲. کمیته تحقیقات دانشجویی دانشگاه علوم پزشکی تبریز، تبریز، ایران

۳. گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تبریز، تبریز، ایران

۴. مرکز تحقیقات سلامت و محیط زیست، دانشگاه علوم پزشکی تبریز، تبریز، ایران

* پست الکترونیکی نویسنده مسئول: hsafari13@yahoo.com

(دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۹/۰۶، پذیرش نهایی: ۱۴۰۳/۱۰/۰۵)

چکیده

آلودگی محیط‌زیست در چندین دهه اخیر به دلیل گسترش فعالیت‌های انسانی افزایش یافته است. صنعتی شدن جهانی و روش‌های کشاورزی مدرن، به بروز آلاینده‌هایی مانند هیدروکربن‌ها، آفت‌کش‌ها و فلزات سنگین منجر شده است. فناوری زیست‌پالایی یک استراتژی کلیدی برای مواجهه با چالش‌های متنوع ناشی از آلودگی محیطی است که از توان میکروارگانیسم‌ها برای پاک‌سازی و حفاظت از اکوسیستم‌ها و حذف آلاینده‌ها از محیط‌های آلوده بهره می‌برد. زیست‌پالایی فرآیندی است که شامل کاهش، حذف، تغییر و تبدیل آلاینده‌ها در محیط‌های طبیعی نظیر خاک، رسوبات، هوا و آب با استفاده از میکروارگانیسم‌ها، قارچ‌ها، گیاهان یا آنزیم‌های آن‌ها به منظور بازگرداندن محیط آسیب‌دیده به شرایط اولیه است. فناوری‌های زیست‌پالایی را می‌توان به دو دسته اصلی درجا و دگرجا تقسیم‌بندی کرد. زیست‌پالایی درجا به تصفیه آلاینده‌ها در محل آلوده اختصاص دارد، در حالی که زیست‌پالایی دگرجا شامل جمع‌آوری و انتقال مواد آلوده به محل دیگری برای تصفیه است. روش‌های زیست‌پالایی درجا شامل تزریق زیستی، تهویه زیستی، تحریک زیستی، مکش زیستی، تقویت زیستی و گیاه‌پالایی هستند. از طرفی، روش‌های دگرجا شامل تصفیه به کمک زمین، کمپوست‌سازی، توده‌های بیولوژیکی، فیلترهای زیستی، راکتورهای زیستی و روش ویندرو می‌باشند. با وجود مزایای فراوان این فناوری نظیر پایداری، هزینه کم و سازگاری با محیط‌زیست، زیست‌پالایی با چالش‌های مهمی مانند ویژگی‌های بیولوژیکی، تنوع زیست‌محیطی، ناهمگونی سایت‌ها، مشکلات مقیاس‌پذیری و موانع نظارتی روبرو است. برای مواجهه با این چالش‌ها، تحقیق، توسعه و مدیریت چندرشته‌ای ضروری است. این مقاله یک مرور جامع از زیست‌پالایی، اهداف، اصول، روش‌ها، عوامل مؤثر، مزایا و چالش‌های پیش روی آن و همچنین چشم‌اندازهای آتی این فناوری را ارائه می‌دهد و بر نیاز به تحقیقات مستمر برای بهینه‌سازی و گسترش کاربرد آن تأکید می‌کند.

واژه‌های کلیدی: آلودگی محیط‌زیست، میکروارگانیسم‌ها، تجزیه زیستی، زیست‌پالایی درجا، زیست‌پالایی دگرجا

مقدمه

افزایش صنعتی شدن جهانی و شیوه‌های کشاورزی مدرن منجر به افزایش بروز آلاینده‌های خاک مانند هیدروکربن‌ها، آفت‌کش‌ها و فلزات سنگین شده است که همه آن‌ها با مشکلات بهداشتی نامطلوب مرتبط هستند. اصلاح خاک‌های آلوده نه تنها برای احیای اکوسیستم بلکه برای توسعه شهری نیز ضروری است. روش‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی برای اصلاح خاک استفاده شده است. زیست پالایی یا فرآیندهای شامل فرآیندهای بیولوژیکی به سرعت به عنوان فناوری‌های تصفیه مؤثر نه تنها به دلیل کارایی بلکه به دلیل سازگاری با محیط زیست و مقرون به صرفه بودن در حال استفاده هستند. این فرآیند قادر به تخریب انواع مختلفی از آلاینده‌ها از جمله هیدروکربن‌های معطر پایدار است. از این رو، زیست پالایی یک فناوری مناسب و مؤثر برای کاهش آلاینده‌های خاک است (۱ و ۲).

فرآیندهای تصفیه بیولوژیکی و استفاده از میکروارگانیسم‌ها در مقایسه با سایر فرآیندهای تصفیه، به عنوان روشی مهم در حذف آلاینده‌های مقاوم در خاک، آب و رسوبات عمل می‌کنند. اصطلاحات زیست پالایی و تجزیه زیستی واژه‌های قابل تفویض تری هستند. فرآیندهای تصفیه بیولوژیکی و استفاده از میکروارگانیسم‌ها در مقایسه با سایر فرآیندهای تصفیه، به عنوان روشی مهم در حذف آلاینده‌های مقاوم در خاک، آب و رسوبات عمل می‌کنند. میکروارگانیسم‌ها در حال بازسازی محیط طبیعی اولیه و جلوگیری از آلودگی بیش تر هستند (۳).

میکروارگانیسم‌ها به طور گسترده در بیوسفر توزیع می‌شوند زیرا توانایی متابولیک آن‌ها بسیار چشم‌گیر است و می‌توانند به راحتی در طیفی از شرایط محیطی رشد کنند. تطبیق پذیری تغذیه‌ای میکروارگانیسم‌ها نیز می‌تواند برای تجزیه زیستی آلاینده‌ها مورد استفاده قرار گیرد. این نوع فرآیند به عنوان زیست پالایی نامیده می‌شود. در این فرآیند از توانایی میکروارگانیسم‌های خاص برای تبدیل، اصلاح و استفاده از آلاینده‌های سمی به منظور به دست آوردن انرژی و تولید زیست توده استفاده می‌شود. به جای جمع‌آوری ساده آلاینده و ذخیره آن، زیست پالایی یک فعالیت سازمان یافته میکروبیولوژیکی است که برای تجزیه یا تبدیل آلاینده‌ها به اشکال عنصری و ترکیبی کم‌تر سمی یا غیرسمی به کار می‌رود. اصلاح‌کننده‌های زیستی^۱ عوامل بیولوژیکی هستند که برای زیست پالایی و تمیز سازی مکان‌های آلوده استفاده می‌شوند. باکتری‌ها، باستانیان (آرکی‌ها)^۲ و قارچ‌ها پاک‌کننده‌های زیستی اولیه هستند (۴).

فناوری زیست پالایی فرآیند کاهش، حذف، تغییر و تبدیل آلاینده‌های موجود در محیط طبیعی مانند خاک، رسوبات، هوا و آب از طریق استفاده از میکروارگانیسم‌ها، قارچ‌ها، گیاهان سبز یا آنزیم‌های آن‌ها برای بازگرداندن محیط طبیعی تغییر یافته توسط آلاینده‌ها به شرایط اولیه است. زیست پالایی، یک فناوری پیشرفته و سازگار با محیط زیست در مدیریت مواد زائد است که از میکروارگانیسم‌های بیولوژیکی طبیعی برای تجزیه مواد خطرناک به اشکال کمتر سمی یا غیر سمی استفاده می‌کند (۱ و ۲). زیست پالایی

¹ Bioremediators

² Archaea

زیست پالایی و کاربرد آن‌ها در پاکسازی محیط زیست استفاده شود. در این مطالعه مروری، اهداف، اصول و عوامل موثر بر زیست پالایی، استراتژی‌ها، انواع روش‌ها، نظارت بر زیست پالایی، مزایا و چالش‌های پیش روی آن و جنبه‌های آتی آن مورد بررسی قرار گرفته است.

اهداف زیست پالایی

تصفیه بیولوژیکی، زیست پالایی، رویکرد مشابهی است که برای تصفیه پسماندها از جمله فاضلاب، پسماندهای صنعتی و مواد زائد جامد استفاده می‌شود. هدف از زیست پالایی این است که غلظت آلاینده را حداقل به سطوح زیر حد تشخیص، غیر سمی یا قابل قبول یعنی در محدوده تعیین شده توسط سازمان‌های نظارتی کاهش دهد یا در حالت ایده‌آل آلاینده‌های آلی را به دی‌اکسید کربن معدنی‌سازی^۱ نماید (۶). به طور کلی اهداف کلیدی زیست پالایی عبارتند از:

- **بازیافت مواد زائد:** زیست پالایی در بازیافت فاضلاب، پساب‌های صنعتی، تصفیه خاک‌های آلوده استفاده می‌شود (۶).

- **سم‌زدایی آلاینده‌ها:** زیست پالایی از میکروارگانیسم‌ها و گیاهان برای تبدیل مواد مضر به ترکیباتی با سمیت کم‌تر یا غیر سمی استفاده می‌کند. این فرآیند سم‌زدایی خطرات زیست‌محیطی و بهداشتی ناشی از مکان‌های آلوده را کاهش می‌دهد (۱).

- **معدنی‌سازی آلاینده‌های آلی:** هدف نهایی زیست پالایی، کانی‌سازی کامل آلاینده‌های آلی است. معدنی‌سازی شامل تجزیه مولکول‌های آلی پیچیده به اشکال عنصری مانند کربن، هیدروژن و چندین عنصر

مؤثرترین ابزار مدیریتی برای مدیریت محیط‌های آلوده و بازیابی خاک آلوده است. این رویکرد قابل‌اعتماد و سازگار با محیط زیست به سرعت در تحقیقات زیست‌محیطی محبوبیت پیدا کرده است. دانشمندان در توسعه فناوری‌های مختلف زیست پالایی برای بازیابی مکان‌های آلوده موفق بوده‌اند. فناوری‌های زیست پالایی را می‌توان در پاک‌سازی آب‌های زیرزمینی، خاک‌ها و تالاب‌های آلوده و همچنین تصفیه جریان‌های پسماند و لجن به کار برد. با استفاده مناسب از میکروبیوم‌های طبیعی و اصلاح‌شده و فرآیندهای آن‌ها و همچنین مدل‌ها یا طرح‌های مهندسی مناسب برای ایجاد یک محیط رشد مطلوب، می‌توان فناوری‌های زیست پالایی را با موفقیت در سایت‌های آلوده به کار برد (۵-۲).

هدف اصلی این مقاله مروری، برجسته کردن ویژگی‌های زیست پالایی و اصول آن، روش‌های مختلف زیست پالایی، یعنی مقوله‌های اصلاح در محل و خارج از محل، مزایا و محدودیت‌های آن‌ها، چشم اندازهای آتی و فعلی فناوری زیست پالایی است که به خوانندگان در انتخاب فناوری مناسب در پاک‌سازی و احیای محیط زیست کمک می‌کند.

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر یک مطالعه توصیفی-مروری است که داده‌های آن از طریق مطالعات کتابخانه‌ای به دست آمده و از منابع مختلف به منظور پردازش مطالب استفاده شده است. با توجه به اهمیت زیست پالایی به عنوان یک فناوری نوآورانه و سازگار با محیط زیست سعی گردید تا حد امکان از مرتبط‌ترین و به‌روزترین منابع حاوی نکات ارزنده در رابطه با انواع روش‌های

¹Mineralization

دیگر همراه با دی اکسید کربن، آب و زیست توده میکروبی است که در نتیجه آلاینده‌ها را به طور کامل از محیط حذف می‌کند (۱-۶)

- **احیای اکوسیستم‌ها:** با حذف آلاینده‌هایی که تعادل اکولوژیکی را مختل می‌کنند، زیست پالایی به بازیابی اکوسیستم‌های طبیعی می‌پردازد. این فرآیند شرایط لازم برای بقا و رشد موجودات مختلف، ارتقای تنوع زیستی و سلامت اکوسیستم را دوباره برقرار می‌کند (۱-۶).

- **رویکرد پایدار و سازگار محیط زیست:** زیست پالایی ذاتاً پایدار و سازگار با محیط زیست است، زیرا از فرآیندهای بیولوژیکی طبیعی استفاده می‌کند، نیاز به مواد شیمیایی مضر را کاهش می‌دهد و اختلالات محیطی را در مقایسه با روش‌های اصلاح شیمیایی و فیزیکی سنتی به حداقل می‌رساند (۱-۶).

- **انطباق با استانداردهای نظارتی:** زیست پالایی تضمین می‌کند که سطوح آلاینده برای برآورده کردن محدودیت‌های نظارتی کاهش می‌یابد و از سلامت انسان و محیط زیست محافظت می‌کند. رعایت مقررات و استانداردها به منظور استفاده مجدد ایمن از سایت‌ها اصلاح شده برای مقاصد مسکونی، کشاورزی یا صنعتی ضروری است (۱-۶).

- **مقرون به صرفه بودن:** زیست پالایی اغلب ثابت می‌کند که مقرون به صرفه تر از روش‌های اصلاحی مرسوم است و معمولاً به منابع و انرژی کمتری نیاز دارد و از نظر اقتصادی گزینه‌ای مناسب برای پروژه‌های پاک‌سازی محیطی در مقیاس بزرگ است (۱-۶).

اصول زیست پالایی

زیست پالایی به عنوان فرآیندی تعریف می‌شود که در آن مواد زاید آلی از نظر بیولوژیکی تحت شرایط

کنترل شده به محصولات بی‌ضرر یا به سطوحی کم‌تر از حد غلظت تعیین شده توسط مقامات نظارتی تجزیه می‌شوند. میکروارگانیسم‌ها برای تجزیه آلاینده‌ها مناسب هستند زیرا آنزیم‌هایی دارند که به آن‌ها اجازه می‌دهد از آلاینده‌های محیطی به عنوان غذا استفاده کنند. هدف از زیست پالایی ترغیب فعالیت میکروارگانیسم‌ها با تامین سطوح بهینه مواد مغذی و سایر مواد شیمیایی ضروری برای متابولیسم آن‌ها به منظور تجزیه یا سم‌زدایی ترکیباتی است که برای محیط زیست و موجودات زنده خطرناک هستند. تمام واکنش‌های متابولیک توسط آنزیم‌ها انجام می‌شود (۷و۸). این آنزیم‌ها به گروه اکسیدوردوکتازها، هیدرولازها، لیازها، ترانسفرازها، ایزومرازها و لیگازها تعلق دارند. بسیاری از آنزیم‌ها به دلیل میل ترکیبی سوبسترای غیراختصاصی و اختصاصی، ظرفیت تجزیه بسیار وسیعی دارند. برای اینکه زیست پالایی مؤثر باشد، میکروارگانیسم‌ها باید به طور آنزیمی به آلاینده‌ها حمله کرده و آن‌ها را به محصولات بی‌ضرر تبدیل کنند. از آنجایی که زیست پالایی تنها زمانی می‌تواند مؤثر باشد که شرایط محیطی اجازه رشد و فعالیت میکروبی را بدهد، کاربرد آن اغلب شامل دست‌کاری پارامترهای محیطی است تا رشد و تجزیه میکروبی با سرعت بیشتری انجام گردد (۸-۱۰).

زیست پالایی به طور طبیعی اتفاق می‌افتد و با اضافه کردن موجودات زنده و اصلاح‌کننده‌ها تقویت می‌شود. فناوری زیست پالایی اساساً مبتنی بر تجزیه زیستی است. منظور از این فناوری حذف کامل آلاینده‌های آلی سمی به ترکیبات بی‌ضرر یا ترکیبات طبیعی مانند دی اکسید کربن، آب و ترکیبات معدنی که برای زندگی انسان، حیوان، گیاه و آبزیان بی‌خطر هستند. مکانیسم‌ها

می‌گذارد. حضور بیش از حد نیتروژن، پتاسیم و فسفر تأثیر منفی بر تجزیه هیدروکربن‌ها دارد. سرعت پاک‌سازی زیستی را نیز می‌توان با آگاهی از دسترسی مواد آلی به میکروارگانیسم‌ها تعیین کرد؛ که به‌عنوان فراهمی زیستی شناخته می‌شود (۱۲ و ۱۳).

فراهمی زیستی آلاینده به میزان جذب آن‌ها به جامدات یا جدا شدن توسط مولکول‌ها در محیط‌های آلوده، انتشار در حفره‌های بزرگ خاک یا رسوب و عوامل دیگری مانند وجود آلاینده‌ها به شکل مایع فاز غیر آبی (NAPL)^۱ بستگی دارد. فراهمی زیستی برای واکنش‌های میکروبی، برای آلاینده‌هایی که به شدت جذب مواد جامد می‌شوند، محصور در ماتریس‌های مولکول‌ها در محیط‌های آلوده می‌شوند، و به‌طور گسترده‌تر در منافذ بزرگ خاک و رسوبات منتشر می‌شوند و یا به شکل NAPL وجود دارند، کم‌تر است (۱۳ و ۱۴).

- تقویت فراهمی زیستی

عمدتاً از سورفکتانت‌های شیمیایی و با درجه غذایی در زیست پالایی برای افزایش آلاینده‌های آلی آب‌گریز استفاده می‌شود. علاوه بر این سورفکتانت‌های تولید شده توسط میکروب‌ها نیز برای کاهش آلاینده‌های محیطی استفاده می‌شوند (۱۴).

- ویژگی‌های مکان مورد نظر (سایت)^۲

ویژگی‌های سایت تأثیر قابل توجهی بر اثربخشی هر استراتژی زیست پالایی دارد. شرایط محیطی سایت که برای کاربردهای زیست پالایی مهم است شامل pH، دما، محتوای آب، در دسترس بودن مواد مغذی و

و مسیرهای متعددی برای تجزیه زیستی طیف گسترده‌ای از ترکیبات آلی مشخص شده است. به‌عنوان مثال، تجزیه زیستی در حضور و غیاب اکسیژن کامل می‌شود (۱۰).



شکل (۱): تصویری از اصول زیست پالایی

عوامل مؤثر بر زیست پالایی

- غلظت آلاینده

غلظت‌های آلاینده به‌طور مستقیم بر فعالیت میکروبی تأثیر می‌گذارد. هنگامی که غلظت‌ها بیش از حد بالا باشد، آلاینده‌ها ممکن است اثرات سمی بر روی باکتری‌های موجود داشته باشند. در مقابل، غلظت کم آلاینده ممکن است از القای آنزیم‌های تجزیه‌کننده باکتری جلوگیری کند. سرعت تجزیه آنزیم‌های کاتابولیک را می‌توان با برهمکنش‌های هم‌افزایی بین اجزای مختلف آلاینده‌ها افزایش داد (۱۱ و ۱۲).

- فراهمی زیستی آلاینده

کربن، نیتروژن، فسفر، پتاسیم و کلسیم نیاز اساسی برای رشد میکروارگانیسم‌ها هستند، غلظت مواد مغذی موجود به‌طور مستقیم بر تجزیه آلاینده‌ها تأثیر

¹ Non-Aqueous Phase Liquids

² Site characterization

پتانسیل ردوکس است. شرایط محیطی موثر بر تجزیه آلاینده‌ها در جدول (۱) ارائه شده است (۱۵ و ۱۶).

pH -

pH بر حلالیت و در دسترس بودن بیولوژیکی مواد مغذی، فلزات و سایر اجزای تشکیل دهنده تأثیر می‌گذارد. برای رشد بهینه باکتری، pH باید در محدوده تحمل میکروارگانیسم‌های هدف باقی بماند. pH بهینه مورد نیاز برای فرآیند زیست پالایی بین ۶ تا ۸ متغیر است. pH خنثی برای تجزیه هیدروکربن‌های نفتی مناسب است در حالی که برخی از قارچ‌ها و میکروب‌های اسید دوست آلاینده‌ها را در محیط اسیدی تجزیه می‌کند (۱۵ و ۱۶).

- پتانسیل ردوکس و میزان اکسیژن

پتانسیل ردوکس و میزان اکسیژن شرایط اکسید کننده یا کاهش دهنده را مشخص می‌کند. پتانسیل ردوکس تحت تأثیر حضور گیرنده‌های الکترون مانند نیترات، اکسیدهای منگنز، اکسیدهای آهن و سولفات است. اکسیژن عامل بسیار مهمی برای تعیین میزان و سرعت تجزیه زیستی آلاینده‌ها است. تجزیه زیستی هوازی بسیار سریع‌تر از تجزیه زیستی بی‌هوازی است. برای تجزیه هوازی آلاینده‌های آلی، در دسترس بودن

اکسیژن نقش مهمی ایفا می‌کند. در اکثر موارد، از افزودن پراکسید هیدروژن برای وارد کردن اکسیژن استفاده می‌شود. پراکسید هیدروژن حدود هفت برابر بیش‌تر از اکسیژن در آب حل می‌شود (۱۵ و ۱۶).

- مواد مغذی

مواد مغذی برای رشد و تقسیم سلول‌های میکروبی مورد نیاز است. مقادیر مناسبی از مواد مغذی نادر برای رشد میکروبی معمولاً وجود دارد، اما مواد مغذی را می‌توان به شکل قابل استفاده یا از طریق اصلاح و ترمیم سوبسترای آلی که به‌عنوان دهنده الکترون نیز عمل می‌کند، برای تحریک زیست پالایی اضافه کرد (۱۵ و ۱۶).

- دما

دما به‌طور مستقیم بر میزان متابولیسم میکروبی و در نتیجه فعالیت میکروبی در محیط تأثیر می‌گذارد. سرعت تجزیه زیستی با افزایش دما تا حدی افزایش می‌یابد و با کاهش دما کاهش می‌یابد. مشخص شده است که دمای بالاتر از ۳۰ تا ۴۰ درجه سلسیوس باعث افزایش زیست پالایی در خاک و همچنین در محیط‌های دریایی می‌شوند (۱۵ و ۱۶).

جدول (۱): شرایط محیطی موثر بر تجزیه آلاینده‌ها (۱۶)

پارامترها	شرایط مورد نیاز برای فعالیت میکروبی	مقدار بهینه برای تجزیه ترکیبات نفتی
رطوبت خاک	۲۵-۲۸ درصد ظرفیت نگهداری آب	۳۰-۹۰ درصد
pH خاک	۵/۵ - ۸/۸	۶/۵ - ۸
میزان اکسیژن	هوازی، حداقل هوا پر شده فضای منافذ ۱۰ درصد	۱۰-۴۰ درصد
میزان مواد مغذی	N و P برای رشد میکروبی	C:N:P = ۱۰۰:۱۰:۱
دما (°C)	۱۵ - ۴۵	۳۰-۲۰
آلاینده‌ها	خیلی سمی نباشند	هیدروکربن ۱۰ - ۵ درصد وزن خشک خاک
فلزات سنگین	مقدار کل ۲۰۰۰ ppm	۷۰۰ ppm
نوع خاک	خاک با محتوای رس یا سیلت کم	-

مزایای زیست پالایی

- یک فرآیند تصفیه طبیعی است که برای تصفیه مواد زائد و پاک‌سازی محل‌های آلوده مانند خاک، به زمان کمی نیاز دارد. میکروب‌ها قادر به تجزیه آلاینده و افزایش تعداد آن‌ها در صورت وجود آلاینده هستند. هنگامی که آلاینده تجزیه می‌شود، جمعیت زیست تجزیه‌پذیر کاهش می‌یابد. بقایای تصفیه معمولاً محصولی بی‌ضرر از جمله دی‌اکسید کربن، آب و زیست‌توده سلولی هستند (۱۷).

- به تلاش بسیار کم‌تری نیاز دارد و اغلب می‌تواند در محل، بدون ایجاد اختلال عمده در فعالیت‌های عادی انجام شود. همچنین نیاز به حمل‌ونقل مواد زائد به خارج از محل و تهدیدات بالقوه ناشی از حمل‌ونقل برای سلامتی انسان و محیط زیست را از بین می‌برد (۱۷).

- در یک فرآیند مقرون‌به‌صرفه به کار می‌رود زیرا کم‌تر از سایر روش‌های متداول (فناوری) که برای پاک‌سازی پسماندهای خطرناک استفاده می‌شود، هزینه کم‌تری دارد. روش مهمی برای تصفیه مکان‌های کوچک آلوده به نفت هست (۱۷).

- همچنین به از بین بردن کامل آلاینده‌ها کمک می‌کند. بسیاری از ترکیبات خطرناک را می‌توان به محصولات بی‌ضرر تبدیل کرد و این ویژگی همچنین احتمال مسئولیت آتی مرتبط با تصفیه و دفع مواد آلوده را از بین می‌برد (۱۸).

- از هیچ‌گونه مواد شیمیایی خطرناک استفاده نمی‌کند. مواد مغذی به‌ویژه اصلاح‌کننده‌هایی که برای رشد فعال و سریع میکروبی اضافه می‌شوند، معمولاً در چمن‌ها و باغ‌ها استفاده می‌شود. به دلیل تغییر ماهیت

مواد شیمیایی مضر به آب و گازهای بی‌ضرر، مواد شیمیایی مضر به‌طور کامل از بین می‌روند (۱۸).

- ساده، کم‌کار و سهولت نسبی اجرا به دلیل نقش طبیعی آن‌ها در محیط زیست (۱۸ و ۱۰).

- مقرون‌به‌صرفه بودن، زیرا هزینه نصب و نگهداری بسیار پایین است (۱۹).

- سازگار با محیط زیست و پایدار بوده و از مقبولیت عمومی بیش‌تری برخوردار است (۱۹).

- آلاینده‌ها از بین می‌روند، نه اینکه به‌سادگی به محیط‌های مختلف منتقل شوند (۱۷).

- غیر مزاحم، به‌طور بالقوه امکان استفاده مداوم از سایت را فراهم می‌کند (۱۸ و ۱۷).

- روشی مؤثر برای پاک‌سازی اکوسیستم طبیعی از تعدادی آلودگی و عمل به‌عنوان گزینه‌های دوست‌دار محیط زیست (۲۰).

معایب زیست پالایی

- محدود به آن دسته از ترکیباتی است که زیست تجزیه‌پذیر هستند. همه ترکیبات مستعد تجزیه میکروبی سریع و کامل نیستند، مانند فلزات، آلاینده‌های آلی کلردار و رادیونوکلئیدها.

- برخی نگرانی‌ها وجود دارد که محصولات حاصل از تجزیه زیستی ممکن است پایدارتر یا سمی‌تر از ترکیب اصلی باشند. گاهی اوقات میکروب‌ها در طی متابولیسم آلاینده‌ها محصولات جانبی یا متابولیک‌های سمی تولید می‌کنند.

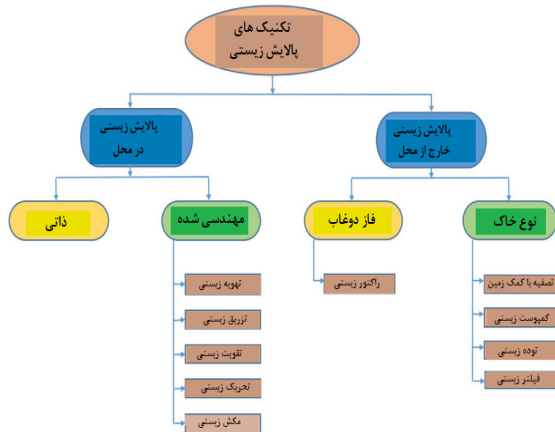
- فرآیندهای بیولوژیکی اغلب بسیار خاص هستند. عوامل مهمی از سایت، مانند وجود جمعیت‌های میکروبی متابولیکی با قابلیت متابولیسم، شرایط رشد

طبقه‌بندی و انواع زیست پالایی

فرآیند زیست پالایی بر اساس منشأ، انتقال و حذف آلاینده‌ها از مکان‌های آلوده، همان‌طور که در شکل (۲) نشان داده شده است، به‌طور کلی به فرایندهای زیست پالایی درجا و زیست پالایی دگرجا طبقه‌بندی می‌شوند.

روش‌های اصلی برای توسعه زیست پالایی عبارتند از: تحریک زیستی^۱، تضعیف زیستی^۳، تقویت زیستی^۴، تهویه زیستی^۵ و توده‌های بیولوژیکی^۶ که عوامل محیطی را برای تکمیل فرایند زیست پالایی فراهم می‌نمایند.

ایده اصلی انواع زیست پالایی، مکانیسم‌ها، مزایا و معایب آن‌ها را می‌توان در جدول (۳) مشاهده کرد (۲۱-۲۴).



شکل (۲): انواع فناوری‌های پالایش زیستی (۲۱)

محیطی مناسب و سطوح مناسب مواد مغذی و آلاینده برای موفقیت زیست پالایی مورد نیاز هستند.

- زیست پالایی باید متناسب با شرایط مکان خاص باشد، یعنی قبل از اعمال این فناوری به منظور تصفیه سایت آلوده^۱ واقعی، یک مطالعه قابل تصفیه باید در مقیاس کوچک انجام شود.

- تعمیم نتایج حاصل از مطالعات آزمایشگاهی و نمونه‌ای (نیمه‌صنعتی) به عملیات میدانی در مقیاس کامل دشوار است.

- برای توسعه و مهندسی فناوری‌های زیست پالایی مناسب برای مکان‌هایی با ترکیب‌های پیچیده از آلاینده‌ها که به‌طور یکنواخت در محیط پراکنده نشده‌اند، تحقیقات جامعی لازم است. آلاینده‌ها ممکن است به‌صورت جامد، مایع و گاز وجود داشته باشند.

- اغلب بیشتر از سایر گزینه‌های تصفیه از قبیل حفاری و حذف خاک یا سوزاندن، زمان می‌برد.

- عدم قطعیت نظارتی در مورد معیارهای عملکردی قابل قبول برای پاک‌سازی زیستی همچنان وجود دارد. هیچ تعریف قابل قبولی از پاک بودن وجود ندارد، ارزیابی عملکرد زیست پالایی دشوار است (۲۱-۲۳).

خلاصه‌ای از انواع فناوری‌های زیست پالایی، به همراه مکانیسم، مزایا و معایب آن‌ها در جدول (۲) ارائه شده است.

² Biostimulation

³ Bioattenuation

⁴ Bioaugmentation

⁵ Bioventing

⁶ Biopiles

¹ Contaminated site

جدول (۲): خلاصه‌ای از مزایا و معایب زیست پالایی درجا و دگرجا (۲۴)

فناوری	مثال	مزایا	محدودیت‌ها	فاکتورهای مهم
درجا	تزریق زیستی	مقرون به صرفه‌ترین	محدودیت‌های زیست محیطی	توانایی‌های زیست تخریب پذیر
	تهویه زیستی	غیر تهاجمی	طولانی شدن زمان تصفیه	میکروارگانسیم‌های بومی
	تحریک زیستی	نسبتاً منفعل	مشکلات نظارتی	وجود فلزات و سایر مواد معدنی
	تقویت زیستی	فرآیند تضعیف طبیعی	فضای مورد نیاز	پارامترهای زیست محیطی
دگرجا	تصفیه به کمک زمین	مقرون به صرفه	طولانی شدن زمان تصفیه	زیست تخریب‌پذیری آلاینده‌ها
	کمپوست‌سازی	هزینه کم	نیاز به کنترل تلفات غیر زیستی	حالات شیمیایی
	توده‌های بیولوژیکی	قابل انجام در محل	مشکل انتقال انبوه	عوامل زمین‌شناسی
		سیتیک تجزیه سریع	محدودیت فراهمی زیستی	توزیع آلاینده‌ها
بیوراکتورها	بیوراکتور دوغابی	افزایش انتقال جرم	نیاز به حفاری خاک	تقویت زیستی
	بیوراکتور آبی	استفاده مؤثر از تلقیح‌ها و سورفکتانت‌ها	هزینه سرمایه‌گذاری نسبتاً بالا	سمیت اصلاح‌کننده‌ها
			هزینه عملیاتی نسبتاً بالا	غلظت‌های سمی آلاینده‌ها

جدول (۳): خلاصه‌ای از انواع فناوری‌های زیست پالایی، مکانیسم، مزایا و معایب آن‌ها (۲۴-۲۱)

زیست پالایی	انواع	جزئیات فناوری	مزایا	معایب
درجا	تهویه زیستی	هوا و مواد مغذی از طریق چاه تأمین می‌شوند.	هزینه کم عملیات	زیست محیطی
	تزریق زیستی	هوا تحت فشار برای افزایش فعالیت میکروبی تزریق می‌شود.	نسبتاً منفعل	دوره طولانی تصفیه
	تقویت زیستی	میکروب‌های تخصصی و اصلاح‌شده ژنتیکی برای هدف قرار دادن آلاینده‌های خاص عرضه می‌شوند.	غیرتهاجمی	مشکلات در پایش و نظارت
	تحریک زیستی	مواد مغذی برای بهینه‌سازی رشد و فعالیت جمعیت میکروبی طبیعی عرضه می‌شود.	فرآیند تضعیف طبیعی	
دگرجا	تصفیه به کمک زمین	خاک سطحی کشت می‌شود و آب و مواد غذایی به آن اضافه می‌شود	هزینه کم عملیات	فضای مورد نیاز
	کمپوست زیستی	تجزیه ضایعات آلی در حضور میکروب‌ها در شرایط هوازی و مواد مغذی بالا	سرعت واکنش سریع	نیاز به کنترل تلفات غیر زیستی
	توده‌های زیستی	ترکیبی از کمپوست‌سازی و تصفیه به کمک زمین است.	آلودگی کم آب‌های زیرزمینی	محدودیت فراهمی زیستی
			محیط مساعدی را برای میکروب‌های بومی فراهم می‌کند.	نیاز به حفاری خاک
		در یک تانک، میکروارگانسیم‌ها واکنش بیولوژیکی را انجام می‌دهند.	سرعت تجزیه بهتر	هزینه سرمایه‌گذاری نسبتاً بالا
			میزان تجزیه بهتر	هزینه عملیاتی نسبتاً بالا
			افزایش نرخ انتقال جرم	

- زیست پالایی درجا

زیست پالایی درجا به عنوان مناسب ترین گزینه در نظر گرفته می شود زیرا تصفیه آلاینده ها در مکان های آلوده واقعی بدون هیچ گونه حفاری یا مزاحمتی انجام می شود (۲۵). این فرایند به زیست پالایی ذاتی درجا^۱ (بدون هیچ گونه اقدامی برای بهبود) یا زیست پالایی تقویت شده درجا (تهویه زیستی، تزریق زیستی و گیاه پالایی^۲) تقسیم می شوند (۲۶). اگر چه روش درجا از نظر اقتصادی مقرون به صرفه است، زیرا هیچ گونه هزینه اضافی برای فرآیندهای حفاری و انتقال مورد نیاز نیست (فقط هزینه طراحی و نصب تجهیزات مورد استفاده برای افزایش فعالیت میکروبی مورد نیاز است)، با این حال، این روش نسبت به روش های زیست پالایی دیگر کمتر قابل کنترل و مؤثر است. این روش برای تصفیه مؤثر مکان های آلوده به رنگ ها، حلال های کلرینه، فلزات سنگین و هیدروکربن ها استفاده می شود (۲۷). تصفیه درجا توسط عمق خاکی که می تواند به طور مؤثر تصفیه شود محدود می شود. در بسیاری از خاک ها، انتشار مؤثر اکسیژن برای سرعت های مطلوب زیست پالایی تنها از چند سانتی متر تا حدود ۳۰ سانتی متر در خاک گسترش می یابد، اگر چه اعماق ۶۰ سانتی متر و بیش تر در برخی موارد به طور مؤثر تصفیه شده است (۲۴).

- زیست پالایی ذاتی درجا

این فناوری زیست پالایی به عنوان تضعیف/پراکندگی طبیعی نیز شناخته می شود و یکی از روش های شناخته شده زیست پالایی درجا هست. این

روش شامل اصلاح بدون کمک و غیرفعال سایت های آلوده بدون هیچ گونه دخالت انسانی است. اصطلاح "تضعیف/پراکندگی طبیعی" به کاهش غلظت آلاینده در حجم معینی از محیط زیست در طول زمان در نتیجه رقیق شدن، پراکندگی یا جذب غیرقابل برگشت آلاینده در محیط اشاره دارد. این فناوری شامل فرآیندهای میکروبی هوازی و بی هوازی برای تصفیه آلاینده های زیست تخریب پذیر و مقاوم است. برای ایجاد یک فرآیند موفق و پایدار، علیرغم عدم وجود نیروهای خارجی در این فرآیند، نظارت منظم مورد نیاز است، بنابراین به عنوان تضعیف طبیعی نظارت شده نیز نامیده می شود (۲۶).

- تضعیف زیستی (طبیعی)

تضعیف زیستی یا طبیعی، ریشه کن کردن آلاینده ها از محیط اطراف است. این فناوری با استفاده از فرآیندهای بیولوژیکی از قبیل تجزیه زیستی هوازی و بی هوازی، جذب گیاهان و حیوانات، پدیده های فیزیکی مانند جابجایی افقی^۳، پراکندگی، رقیق سازی، انتشار، تبخیر، جذب/واجذب و واکنش های شیمیایی از قبیل تبادل یون، کمپلکس سازی، تغییر شکل غیر زیستی^۴ انجام می شود. اصطلاحاتی مانند پاک سازی ذاتی^۵ یا تبدیل زیستی^۶ در تعریف کلی تر تضعیف طبیعی گنجانده شده است (۲۸).

زیست پالایی ذاتی^۷ دنبال کردن فرآیند طبیعی تجزیه زیستی است و از طریق آن میکروارگانیسم های طبیعی موجود در محیط در همان شرایط طبیعی حذف آلودگی ها را تا سطح قابل قبولی انجام می دهند. به طور

³ Advection⁴ Abiotic transformation⁵ Intrinsic remediation⁶ Biotransformation⁷ Intrinsic bioremediation¹ Intrinsic in situ bioremediation² Phytoremediation

- زیست پالایی تقویت شده درجا

این نوع زیست پالایی درجا شامل تقویت مکان‌های آلوده با حفاری یا افزودن مواد مغذی، هوا و میکروب‌ها به منظور افزایش رشد میکروبی برای فرآیند تجزیه زیستی است. فناوری‌هایی مانند تقویت زیستی، تحریک زیستی، مکش زیستی، تزریق زیستی و تهویه زیستی نمونه‌هایی از روش زیست پالایی بهبودیافته درجا هستند (۲۹).

- تقویت زیستی

یکی از مکانیسم‌های تجزیه زیستی، تقویت زیستی است. افزودن میکروارگانیسم‌های تجزیه‌کننده آلاینده (طبیعی/غیربومی/مهندسی شده) به منظور افزایش ظرفیت تجزیه زیستی جمعیت‌های میکروبی بومی در منطقه آلوده تحت عنوان فرآیند تقویت زیستی شناخته می‌شود. به منظور افزایش سریع رشد جمعیت میکروارگانیسم‌های طبیعی و افزایش نرخ تجزیه که ترجیحاً از محل آلاینده‌ها تغذیه می‌کند، میکروب‌ها از محل پاک‌سازی^۱ جمع‌آوری شده، به طور جداگانه کشت و اصلاح ژنتیکی می‌شوند و در نهایت به محل بازگردانده می‌شوند. برای اطمینان، همه میکروارگانیسم‌های ضروری در مکان‌هایی یافت می‌شوند که خاک و آب‌های زیرزمینی با اتن‌های کلردار از قبیل تتراکلرواتیلن و تری‌کلرواتیلن آلوده شده‌اند. این فرآیند برای اطمینان از اینکه میکروارگانیسم‌های درجا^۲ می‌توانند این آلاینده‌ها را کاملاً حذف کرده و به اتیلن و کلرید غیرسمی تبدیل کنند، استفاده می‌شود (۳۰).

کلی این اولین انتخاب برای حذف آلودگی به روش زیستی است به این دلیل که هیچ مداخله‌ای در آن صورت نمی‌گیرد و فقط روند طبیعی کار دنبال می‌شود.

هنگامی که محیط با مواد شیمیایی آلوده می‌شود، طبیعت می‌تواند به چهار روش آن را پاک‌سازی نماید (۲۸):

۱- حشرات کوچک یا میکروب‌هایی که در خاک و آب‌های زیرزمینی زندگی می‌کنند از برخی مواد شیمیایی برای غذا استفاده می‌کنند. هنگامی که آن‌ها مواد شیمیایی را به طور کامل هضم می‌کنند، می‌توانند آن‌ها را به آب و گازهای بی‌ضرر تبدیل کنند.

۲- مواد شیمیایی می‌توانند به خاک چسبیده و یا جذب آن شده و تحرک خود را از دست دهند. در این حالت مواد شیمیایی حذف نمی‌شود، اما می‌تواند از آلودگی آب‌های زیرزمینی و خروج مواد شیمیایی از محل جلوگیری کند.

۳- همان‌طور که آلودگی در خاک و آب‌های زیرزمینی حرکت می‌کند، می‌تواند با آب تمیز مخلوط شود. این امر منجر به کاهش یا رقیق شدن آلودگی می‌شود.

۴- برخی از مواد شیمیایی مانند نفت و حلال‌ها می‌توانند تبخیر شوند، به این معنی که در داخل خاک از حالت مایع به گاز تبدیل می‌شوند. اگر این گازها در سطح زمین به هوا انتقال یابد، نور خورشید ممکن است آن‌ها را از بین ببرد. اگر تضعیف طبیعی به اندازه کافی سریع یا کامل نباشد، زیست پالایی با تحریک زیستی یا تقویت زیستی افزایش می‌یابد.

¹ Remediation site

² In situ

جمعیت میکروارگانیسم یا دیرتجزیه پذیر و سرسخت بودن ماده شیمیایی هدف منجر به کسب نتایج قابل قبولی نشوند، استفاده می شود. به همین منظور باکتری هایی را که توانایی انجام فعالیت مورد نظر را به طور طبیعی یا با استفاده از فناوری های مهندسی ژنتیک داشته باشند مستقیماً وارد منطقه آلوده می کنند. در این روش اگر نیاز باشد مواد غذایی هم وارد می شود (۳۴ و ۳۵).

- تحریک زیستی

این نوع استراتژی از طریق تزریق مواد مغذی خاص در محل (خاک/آب زیرزمینی) برای تحریک فعالیت میکروارگانیسم های بومی صورت می گیرد. تمرکز آن بر تحریک باکتری ها و قارچ های بومی یا طبیعی موجود است. اولاً با تأمین اصلاح کننده ها، مکمل های رشد و مواد معدنی کمیاب. ثانیاً با فراهم نمودن سایر الزامات محیطی مانند pH، دما و اکسیژن برای سرعت بخشیدن به سرعت متابولیسم و مسیر آنها (۳۶-۱۰). وجود مقادیر کمی از آلاینده می تواند با روشن کردن اپرون ها^۲ برای آنزیم های زیست پالایی به عنوان محرک عمل کند. این نوع مسیر استراتژیک بیشتر اوقات با افزودن مواد مغذی و اکسیژن برای کمک به میکروارگانیسم های بومی ادامه می یابد. این مواد مغذی بلوک های اساسی زندگی هستند و به میکروب ها اجازه می دهند تا نیازهای اساسی مانند انرژی، زیست توده سلولی و آنزیم ها را برای تجزیه آلاینده ایجاد کنند. همه آنها به نیتروژن، فسفر و کربن نیاز دارند (۳۶). در واقع بهبود شرایط محیطی نظیر

تقویت زیستی فرآیند افزودن میکروب های مهندسی شده در سیستمی است که به عنوان پاک کننده های زیست محیطی به منظور حذف سریع و کامل آلاینده های پیچیده عمل می کنند. علاوه بر این، ثابت شده است که میکروارگانیسم های اصلاح شده ژنتیکی، به دلیل داشتن پروفایل های متابولیکی متنوع، دارای راندمان بالایی در تجزیه و تبدیل طیف وسیعی از آلاینده های محیطی به محصولات نهایی ساده و بی ضرر هستند (۳۲ و ۳۱). میکروارگانیسم های طبیعی به اندازه کافی سریع نیستند تا ترکیبات خاصی را تجزیه کنند، بنابراین برای تسهیل باید از طریق دست کاری^۱ DNA اصلاح ژنتیکی شوند. میکروب های دست کاری شده ژنتیکی آلاینده ها را بسیار سریع تر از گونه های طبیعی تجزیه می کنند و به شدت با گونه های بومی، شکارچیان و همچنین عوامل مختلف غیرزنده رقابت می کنند (۳۳ و ۳۲). میکروارگانیسم های دست کاری شده ژنتیکی پتانسیل پاک سازی زیستی خاک، آب های زیرزمینی و لجن فعال را نشان داده اند و توانایی آنها در تجزیه طیف وسیعی از آلاینده های شیمیایی و فیزیکی به طور قابل توجهی افزایش یافته است (۳۴-۳۲).

از فرایند تقویت زیستی زمانی استفاده می شود که میکروارگانیسم های خود محیط قادر به تجزیه نباشند یا اینکه ماده آلوده کننده محیط ساختاری پیچیده داشته و از طیف وسیعی از ترکیبات تشکیل شده باشد. در واقع از این فرایند هنگامی که روش های تحریک زیستی و زیست پالایی ذاتی به دلایلی مانند کم بودن

¹ Manipulation

^۲ Operon: گروهی از ژن های مجاور یکدیگر روی کروموزوم که به شکل یکپارچه روشن و خاموش می شوند. معمولاً آنزیم هایی تولید می کنند که مراحل متفاوت یک مسیر زیست شیمیایی را با یک ژن واحد کنترل می کنند.

تحریک رشد باکتری‌ها و قارچ‌های طبیعی یا وارد شده در خاک انجام می‌شود. در واقع، این روش بیش‌تر برای تجزیه آلاینده‌ها و ترکیبات تجزیه‌پذیر به صورت هوازی نظیر هیدروکربن‌ها، ترکیبات آلی فرار (VOCs^۲) کاربرد دارد. تهویه بیولوژیکی از نرخ جریان هوای کم استفاده می‌کند تا فقط اکسیژن کافی برای حفظ فعالیت میکروبی را فراهم کند (۳۸). اکسیژن بیشتر از طریق تزریق مستقیم هوا به آلودگی باقی‌مانده در خاک توسط چاه‌ها تأمین می‌شود. بقایای سوخت جذب‌شده به صورت زیستی تجزیه می‌شوند و ترکیبات فرار نیز با حرکت آهسته بخار در خاک فعال بیولوژیکی، تجزیه زیستی می‌شوند. زیست پالایی مؤثر خاک‌آلوده به نفت با استفاده از تهویه زیستی توسط بسیاری از محققین ثابت شده است. کارایی فرایند تهویه زیستی در اصلاح خاک‌های آلوده به فنانترن با حذف آلودگی بیش از ۹۳ درصد پس از ۷ ماه گزارش شده است (۳۹ و ۳۸).

- مکش زیستی^۳

فناوری مکش زیستی که به عنوان استخراج دو فاز نیز شناخته می‌شود، بسیاری از فرآیندها مانند پمپاژ افزایش‌یافته خلأ، تهویه زیستی و استخراج بخار خاک (SVE^۴) را برای حذف آلاینده‌های خاک و آب‌های زیرزمینی با استفاده از تأمین غیرمستقیم اکسیژن و تحریک تجزیه زیستی میکروبی، همان‌طور که در شکل (۳) نشان داده شده است، ترکیب می‌کند (۴۰-۲۱).

اضافه کردن مواد غذایی یا هوادهی است. این روش هنگامی صورت می‌گیرد که سرعت تجزیه زیستی در محیط آلوده، به طور طبیعی کم باشد و به همین دلیل میکروارگانیسم‌های موجود در محیط تحریک‌شده تا مواد شیمیایی هدف را تجزیه کنند. در این موارد معمولاً جمعیت تجزیه‌کننده به اندازه کافی حضور دارد ولی شرایط محیطی برای فعالیت آن‌ها مساعد نیست. این شرایط نامساعد می‌تواند، نبودن اکسیژن، pH نامناسب، کمبود مواد مغذی به شکل معدنی، کمبود رطوبت و دمای نامناسب، باشد یا اینکه میزان در دسترس بودن ماده شیمیایی موردنظر مطلوب نباشد. با مساعد کردن شرایط محیطی می‌توان سرعت تجزیه زیستی را توسط میکروارگانیسم‌های خود محیط، افزایش داد (۳۷ و ۳۶). در یک پژوهش کارایی فرایند زیست پالایی در ترکیب با الکتروکینتیک (EK^۱) در اصلاح خاک‌های رسی آلوده به ۲،۴-دی کلروفنوکسی استیک اسید در مقیاس آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج این مطالعه نشان داد که ترکیب فرایند الکتروکینتیک با تحریک زیستی و تقویت زیستی به ترتیب منجر به حذف ۱۰۰ درصد و ۸۵-۷۵ درصد آلاینده بعد از ۱۰ روز شدند (۱۹).

- تهویه زیستی

در این روش با تزریق هوا یا اکسیژن در ناحیه غیراشباع خاک، میکروارگانیسم‌های بومی خاک تحریک گردیده و آلاینده‌های آلی موجود در خاک را مورد تجزیه قرار می‌دهند. تهویه زیستی از طریق تأمین اکسیژن برای میکروارگانیسم‌های موجود خاک و

^۲ Volatile Organic Compounds

^۳ Bioslurping

^۴ Soil Vapour Extraction

^۱ Electrokinetics

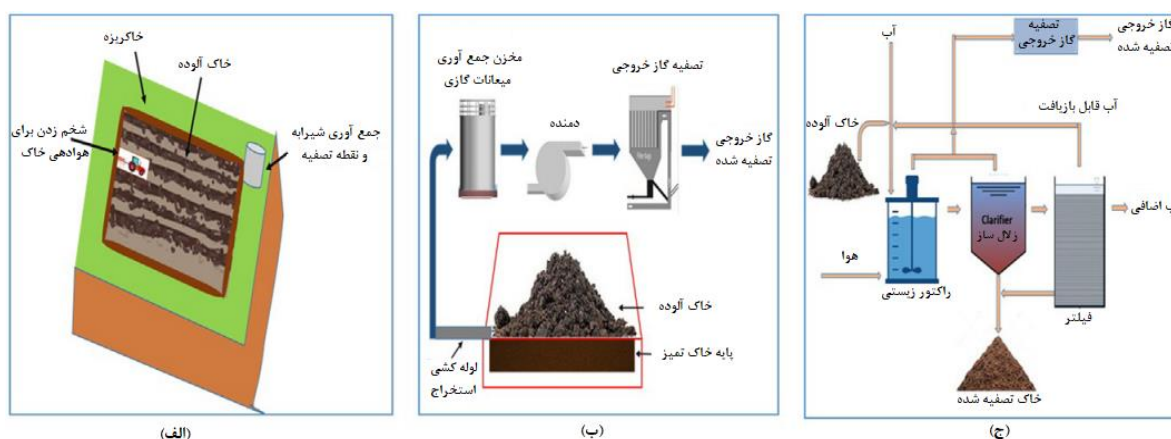
برخلاف فرآیند تهویه زیستی، در فرآیند تزریق زیستی، هوا به زیر سطح خاک (منطقه اشباع) وارد می‌شود که می‌تواند باعث حرکت رو به بالا آلاینده‌های آلی فرار به سطح منطقه، برای فرآیند تجزیه زیستی شود و همچنین حذف آلاینده‌ها از محل آلوده توسط تحریک فعالیت میکروبی همان‌طور که در شکل (۳) نشان داده شده است افزایش می‌دهد. این فرآیند توسط دو عامل اصلی، یعنی نفوذپذیری خاک و زیست‌تخریب‌پذیری آلاینده تسهیل می‌شود (۲۵).

فرآیند تزریق زیستی به‌طور گسترده‌ای برای تصفیه آبخوان‌های آلوده به BTEX^۳ (بنزن، تولوئن، اتیل بنزن و زایلن) و فرآورده‌های نفتی مورد استفاده قرار گرفته است. کاهش کلی بیش از ۷۰ درصد BTEX نشان می‌دهد که می‌توان از تزریق زیستی برای اصلاح آب‌های زیرزمینی آلوده به BTEX استفاده کرد. با این حال، محدودیت اصلی، پیش‌بینی جهت جریان هوا است (۴۲).

محدودیت این روش نفوذپذیری کم خاک است که باعث کاهش سرعت انتقال اکسیژن و کاهش بیشتر فعالیت میکروبی می‌شود. این فناوری‌ها به‌طورکلی برای حذف آلاینده‌های آلی فرار و نیمه فرار از خاک و مایع استفاده می‌شوند. این روش می‌تواند برای بازیابی مناطق غیر اشباع و اشباع و همچنین مایعات فاز غیرآبی سبک^۱ (LNAPL) استفاده شود. این فناوری می‌تواند برای اصلاح خاک‌های آلوده به مواد آلی قابل اشتعال و نسبتاً قابل اشتعال استفاده شود (۴۱).

برای کاهش فعالیت میکروبی، در این فرآیند از رطوبت خاک به منظور کاهش نفوذپذیری هوا و سرعت انتقال اکسیژن استفاده می‌شود. استفاده از این روش حتی در خاک‌هایی با نفوذپذیری کم، به دلیل استفاده کم‌تر از آب زیرزمینی باعث صرفه‌جویی در هزینه ذخیره‌سازی، دفع و تصفیه می‌شود (۴۰).

تزریق زیستی^۲



شکل (۳): تصویری از فناوری‌های زیست پالایی درجا: (الف) تهویه زیستی، (ب) مکش زیستی و (ج) تزریق زیستی (۲۵)

³ Benzene, Toluene, Ethylbenzene and Xylenes

¹ Light Nonaqueous Phase Liquids

² Biosparging

- سد واکنشی نفوذپذیر (PRB)^۱

این روش به دلیل طراحی و مکانیسم حذف آلاینده‌ها بیش‌تر به عنوان یک روش فیزیکی برای اصلاح آب‌های زیرزمینی آلوده تلقی می‌شود. با این وجود، محققان گزارش دادند که واکنش بیولوژیکی یکی از چندین مکانیسم (تجزیه، ترسیب و جذب) حذف آلاینده در تکنیک PRB است. اگرچه عبارات جایگزینی مانند PRB بیولوژیکی، سد بیوراکتیو غیرفعال، PRB تقویت‌شده زیستی نیز برای تطبیق جنبه‌های زیست‌پالایی یا بیوتکنولوژی این فرایند پیشنهاد شده‌اند. نقش میکروارگانیسم‌ها در این فرایند بیشتر به‌جای یک بیوتکنولوژی مستقل، تقویت‌کننده گزارش شده است (۴۳). به طور کلی، PRB یک زیست‌پالایی درجا است که برای اصلاح آب‌های زیرزمینی آلوده به انواع مختلف آلاینده‌ها از جمله فلزات سنگین و ترکیبات کلردار استفاده می‌شود. در این فناوری، یک سد واکنشی دائمی یا نیمه دائمی (متوسط) که عمدتاً از آهن صفر ظرفیتی تشکیل شده است، در مسیر آب‌های زیرزمینی آلوده غوطه‌ور می‌شود. همانطور که آب آلوده از طریق سد تحت‌گردان طبیعی خود جریان می‌یابد، آلاینده‌ها به دام می‌افتند و تحت مجموعه‌ای از واکنش‌ها قرار می‌گیرند که منجر به آب تمیز می‌شود. در حالت ایده‌آل، موانع معمولاً برای به دام انداختن آلاینده‌ها به اندازه کافی واکنش‌پذیر بوده و برای عبور جریان آب به اندازه کافی نفوذپذیر هستند، ولی برای عبور آلاینده‌ها نفوذپذیر نیستند. از سایر ویژگی‌های موانع می‌توان به مواردی نظیر، غیرفعال با ورودی انرژی کم، ارزان، به‌راحتی در دسترس و قابل دستیابی اشاره نمود.

اتریخشی این فرایند بیشتر به نوع محیط مورد استفاده بستگی دارد که تحت تأثیر نوع آلاینده، شرایط بیوژئوشیمیایی و هیدروژئولوژیکی، تأثیر محیطی و بهداشتی، پایداری مکانیکی و هزینه می‌باشد (۴۳ و ۴۴). اخیراً، محققان بر ترکیب کردن PRB و روش‌های دیگر مانند الکتروکیتیک برای تصفیه کلاس‌های مختلف آلاینده‌ها تمرکز کرده‌اند. حذف ۹۰ درصد نیترات از خاک رسی خوشه‌ای با استفاده از فناوری هیبریدی الکتروکیتیک و PRB در مدت زمان یک هفته گزارش شده است. تصفیه خاک‌های رسی آلوده به گازوئیل با استفاده از فرایند ترکیبی الکتروکیتیک و Bio-PRB^۲ پس از ۲ هفته عملیات، منجر به حذف ۳۰-۳۹ درصد بخش‌های زیست‌تخریب‌پذیر دیزل گردید. ظاهراً این تکنیک‌های ترکیبی به خاک آلوده اجازه می‌دهد تا شرایط محیطی مناسب (pH، دما، مواد مغذی) مورد نیاز برای رشد میکروبی را حفظ کند و منجر به توزیع زیست‌توده سورفاکتانت در چنین خاک‌های آلوده شود (۲۶).

- زیست‌پالایی دگرجا

همان‌طور که از نام آن پیداست، روش زیست‌پالایی دگرجا (خارج از محل) شامل حفاری و انتقال آلاینده‌ها از محل آلوده واقعی به مکان دیگری و سپس حذف آلاینده‌ها با استفاده از چندین فناوری زیست‌پالایی است. فناوری‌های زیست‌پالایی دگرجا بر اساس انواع آلاینده، عمق و درجه آلودگی، هزینه تصفیه و ویژگی‌های جغرافیایی و زمین‌شناسی سایت آلوده به دسته‌های مختلفی از جمله تصفیه به کمک زمین، کمپوست‌سازی، توده بیولوژیکی، راکتورهای زیستی و پالایه‌های زیستی طبقه‌بندی می‌شوند. پس از

^۱ Permeable Reactive Barrier^۲ Biological-Permeable Reactive Barrier

تصفیه با فناوری‌های اصلاح خارج از محل، خاک‌های پاک‌سازی شده می‌توانند برای اهداف محوطه‌سازی استفاده شوند (۲۱).

- توده‌های بیولوژیکی (بیوپیل‌ها)

توده‌های بیولوژیکی روشی از خاک حفاری شده آلوده به هیدروکربن‌های قابل اصلاح به صورت هوازی است که می‌تواند در توده‌های بیولوژیکی تصفیه شود. توده‌های بیولوژیکی (همچنین به عنوان سلول‌های بیولوژیکی، کپه‌های بیولوژیکی^۱، تپه‌های بیولوژیکی^۲ و پیل‌های کمپوست نیز شناخته می‌شوند) برای کاهش غلظت آلاینده‌های نفتی در خاک‌های حفاری شده در طول زمان تجزیه زیستی استفاده می‌شوند. در این فرآیند، هوا طی یک سیستم لوله‌کشی و پمپ‌هایی که هوا را تحت فشار مثبت وارد توده می‌کند و یا تحت فشار منفی هوا را از داخل توده می‌کشد، برای سیستم توده‌های بیولوژیکی تأمین می‌شود. فعالیت میکروبی از طریق تنفس میکروبی افزایش می‌یابد و متعاقب آن تجزیه آلاینده‌های نفتی افزایش می‌یابد. از این روش در صورت محدود بودن فضای پاک‌سازی استفاده می‌شود. در این روش توده‌ها و تل‌هایی از خاک آلوده وجود دارد که اکسیژن تحت فشار وارد آن‌ها می‌شود و برای تأمین رطوبت آب به صورت قطره‌ای بر روی توده اسپری می‌شود و مواد غذایی به صورت محلول یا جامد به توده اضافه می‌شوند (۴۵).

روش توده‌های بیولوژیکی ترکیبی از روش‌های تصفیه به کمک زمین و کمپوست‌سازی است. این فرآیند شامل آزمودن آزمایشگاهی نمونه خاک آلوده

برای بررسی پتانسیل تجزیه، جداسازی مکانیکی نمونه خاک برای همگن شدن خاک، انباشته شدن خاک آلوده حفاری شده، اصلاحات بیش‌تر خاک با مواد مغذی و هوادهی اجباری برای افزایش تجزیه میکروبی هست. همچنین، میکروب‌های قوی را می‌توان برای پاک‌سازی مؤثر آلاینده به توده بیولوژیک اضافه کرد (۴۶ و ۲۱). همانطور که در شکل (۴) نشان داده شده است، کل آرایش این سیستم شامل بستر تصفیه و مواد مغذی، سیستم هوادهی، سیستم آبیاری مدفون در زیر خاک و سیستم جمع‌آوری شیرابه است (۴۹).

توده‌های بیولوژیکی عمدتاً برای تصفیه خاک‌های آلوده به آلاینده‌های با وزن مولکولی پایین و هیدروکربن‌های نفتی مانند BTEX، PAHs^۳ و ترکیبات فنلی^۴ استفاده می‌شود و می‌تواند به‌طور مؤثر در اصلاح یک محیط بسیار آلوده مانند مناطق سرد استفاده شود (۴۷). این فناوری به دلیل مقرون‌به‌صرفه بودن به‌طور فزاینده‌ای برای زیست پالایی استفاده می‌شود و دما، pH و شرایط مواد مغذی را می‌توان برای زیست پالایی کنترل کرد. استفاده از توده‌های بیولوژیکی در مکان‌های آلوده می‌تواند به محدود کردن تبخیر آلاینده‌های با وزن مولکولی کم^۵ (LMW) کمک کند (۴۸-۵۰). در همین راستا، محققین تأثیر نرخ‌های مختلف کاربرد (۳ و ۶ میلی‌لیتر بر متر مکعب) کنسرسیون‌های میکروبی و کمپوست بالغ (۵ و ۱۰ درصد) را بر کاهش کل هیدروکربن‌های نفتی (TPH) در توده‌های بیولوژیکی در مقیاس زراعی و شرایط دمای پایین مورد مطالعه قرار دادند. در پایان دوره

³ Polyaromatic Hydrocarbones

⁴ Phenols

⁵ Low Molecular Weight

¹ Bioheaps

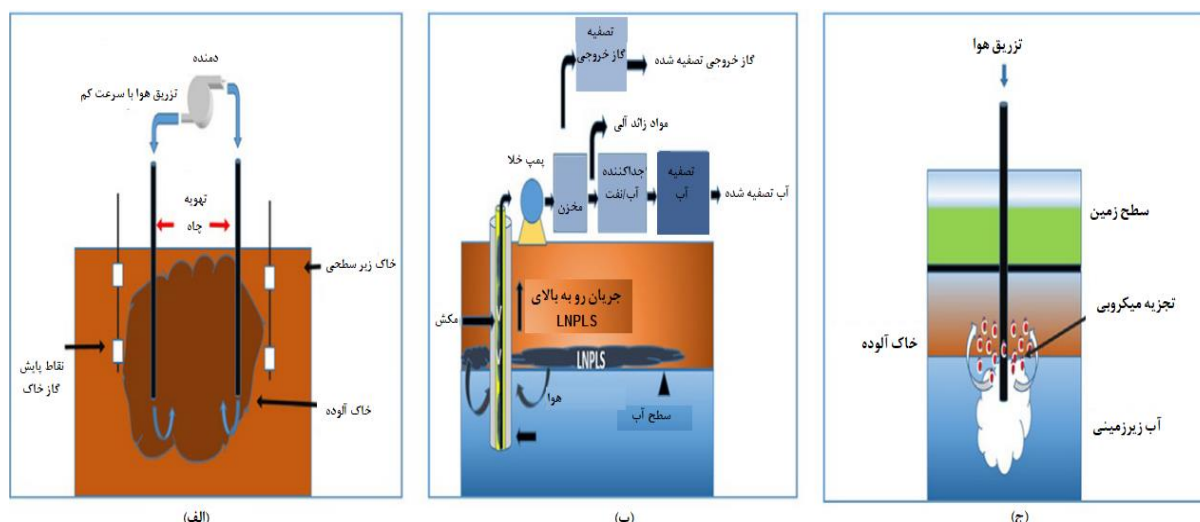
² Biomounds

اگرچه توده‌های بیولوژیکی در مقایسه با سایر فناوری‌های زیست پالایی دگرجا، از جمله روش تصفیه به کمک زمین، به فضای کمتری نیاز دارند. با این حال، نیاز به تجهیزات مهندسی پیشرفته، هزینه‌های نگهداری و بهره‌برداری بالا، کمبود منبع تغذیه به‌ویژه در مکان‌های دور دست برخی از محدودیت‌های توده‌های بیولوژیکی‌ها هستند. علاوه بر این، گرمای بیش از حد هوا می‌تواند با خشک نمودن خاک تحت تصفیه با فناوری زیست پالایی، منجر به مهار فعالیت‌های میکروبی و متعاقب آن افزایش میزان تبخیر خاک به‌جای تجزیه زیستی آن توسط موجودات زنده باشد (۵۵-۵۱). همچنین وسعت هوازگی می‌تواند با آب‌گریزتر کردن مواد، ترکیب شیمیایی را تغییر داده و در نتیجه پتانسیل روش توده‌های بیولوژیکی برای تجزیه زیستی محدود می‌شود (۵۶).

کربن آلی زیستی در دسترس (BOC^2) نقش مهمی در فناوری زیست پالایی با استفاده از توده‌های بیولوژیکی ایفا می‌کند. زیست پالایی خاک‌های آلوده به نفت به منظور حذف کل هیدروکربن نفتی (TPH) با استفاده از آلفا، بتا و پروتئوباکتری‌های گاما، تحت شرایط دمایی مزوفیلیک ($30^{\circ}C-40^{\circ}C$) و میزان هوادهی کم صورت گرفته است (۵۷). سیستم‌های توده بیولوژیکی همچنین برای تصفیه خاک‌های آلوده به گازوئیل در منطقه زیر قطب جنوب استفاده شده است. در مجموع ۹۳ درصد از TPH با استفاده از سیستم توده بیولوژیکی ظرف مدت یک سال حذف شده است (۵۸).

مطالعه (۹۴ روز)، ۹۰/۷ درصد کاهش TPH در شرایط زیست پالایی تقویت‌شده و تحریک‌شده زیستی در مقایسه با شرایط کنترل با میانگین حذف ۴۸ درصد به دست آمد (۴۹). گزارش شده است که غلظت نهایی هیدروکربن‌های نفتی کل^۱ (TPH) در توده‌های بیولوژیکی مرطوب حاوی رطوبت بهینه و آلاینده‌های با حداقل تبخیر و قابلیت تجزیه کمتر، در مقایسه با توده‌های بیولوژیکی حرارت دیده و غیرفعال، بسیار پایین است (۵۱). علاوه بر این، گزارش شده است که از توده‌های بیولوژیکی می‌توان برای تصفیه حجم زیادی از خاک آلوده در یک فضای محدود استفاده کرد. راه‌اندازی توده‌های بیولوژیکی را می‌توان به راحتی تا حد یک سیستم آزمایشی برای دستیابی به عملکرد مشابه به‌دست‌آمده در طول مطالعات آزمایشگاهی مقیاس‌بندی کرد (۵۲). برای کارایی توده‌های بیولوژیکی، الک کردن و هوادهی خاک آلوده قبل از فرآوری مهم است. عوامل حجیم‌کننده مانند کاه، گرد و غبار اره، پوست یا تراشه‌های چوب و سایر مواد آلی برای بهبود فرآیند اصلاح در ساختار توده‌های بیولوژیکی اضافه شده‌اند (۵۳-۵۰). برای پر کردن هوا به خاک انباشته شده آلوده در توده‌های بیولوژیکی، می‌توان از تکنیک‌های زیست پالایی خارج از محل مانند تصفیه به کمک زمین، مکش زیستی و تهویه زیستی استفاده کرد. با این حال، پیاده‌سازی این تکنیک‌ها پرهزینه است و به منبع تغذیه در مکان‌های دور نیاز دارد (۵۴).

² Bio-available Organic Carbon¹ Total Petroleum Hydrocarbon



شکل (۴): تصویری از فناوری‌های زیست پالایی در محل: (الف) تصفیه به کمک زمین، (ب) توده بیولوژیکی و (ج) بیوراکتور (۴۹)

- تصفیه به کمک زمین

در فناوری تصفیه به کمک زمین، خاک آلوده حفاری و پخش می‌شود و هرچند روز یکبار لایه خاک بالای سطح زمین زیرورو می‌شود تا امکان تجزیه بیولوژیکی هوازی آلاینده‌ها توسط میکروب‌های موجود در خاک فراهم شود (شکل (۴)). در این روش یک لایه خاک آلوده به روی سطح خاک تمیز اضافه می‌شود و در صورت نیاز مواد مغذی و هوا نیز در محیط تأمین می‌گردد تا میکروارگانیسم‌های موجود در خاک تمیز (با زیرورو کردن متناوب این دو لایه) باعث حذف آلاینده‌های خاک آلوده گردند. خاک‌ورزی^۱، هوادهی، مواد مغذی و آبیاری را برای افزایش فعالیت میکروبی در طول تصفیه به کمک زمین فراهم می‌کند (۵۹). مشاهده می‌شود که تصفیه به کمک زمین تنها برای تصفیه خاک سطحی به عمق ۱۰ الی ۳۵ سانتی‌متر قابل انجام است (۲۰). pH خنثی را می‌توان با استفاده از آهک کشاورزی حفظ کرد. اگرچه تصفیه به کمک زمین به‌عنوان یک روش زیست پالایی دگرجا در نظر

گرفته می‌شود، اما در موارد معدودی می‌توان آن را یک روش زیست پالایی درجا در نظر گرفت. این روش بیش‌تر در تصفیه مکان‌های آلوده به هیدروکربن‌های آروماتیک آلیفاتیک و چند حلقه‌ای و PCBها استفاده می‌شود (۶۰). این فناوری به دلیل نیاز به تجهیزات کمتر، هزینه نگهداری و بهره‌برداری کم به‌عنوان ساده‌ترین و ارزان‌ترین گزینه محسوب می‌شود و به همین دلیل به‌عنوان یک روش جایگزین تلنبارسازی^۲ بیش‌ترین توجه را به خود جلب کرده است (۶۱).

- بیوراکتورها (راکتورهای زیستی)

در این روش به‌طورکلی از یک راکتور یا مخزن برای تجزیه آلاینده تحت شرایط کنترل‌شده استفاده می‌شود. بیوراکتورها خاک‌های آلوده را در دو فاز جامد و مایع (دوغاب) تصفیه می‌کنند. فرآیند تصفیه فاز جامد به صورت مکانیکی خاک را با ساییدگی و مخلوط کردن در یک ظرف در بسته تجزیه می‌کند. هدف از اختلاط تضمین این است که آلاینده‌ها، آب، هوا، مواد مغذی و میکروارگانیسم‌ها در تماس دائمی

¹ Tillage

² Dumping

با میکروپها برای حذف آلاینده‌های گازی استفاده می‌شود (۲۳).

- ویندرو^۱

به‌عنوان یکی از فناوری‌های زیست‌پالایی دگرجا، روش ویندرو به چرخش دوره‌ای خاک‌آلوده انباشته برای تقویت زیست‌پالایی با افزایش فعالیت‌های باکتری‌های بومی و یا غیربومی (موقتی)^۲ تجزیه‌کننده پلاستیک‌های مبتنی بر هیدروکربن موجود در خاک آلوده تکیه می‌کند. چرخش دوره‌ای خاک آلوده به همراه افزودن آب باعث افزایش هوادهی، توزیع یکنواخت آلاینده‌ها، مواد مغذی و فعالیت‌های تجزیه‌کننده میکروبی می‌شود و در نتیجه سرعت زیست‌پالایی را افزایش می‌دهد که می‌تواند از طریق جذب، تبدیل زیستی و معدنی‌سازی انجام شود. با این وجود، به دلیل چرخش دوره‌ای مرتبط با تصفیه ویندرو، ممکن است این روش بهترین گزینه برای اصلاح خاک آلوده به مواد فرار سمی نباشد. تصفیه ویندرو یکی از منابع تولید متان (گاز گلخانه‌ای) به دلیل ایجاد منطقه بی‌هوازی در خاک آلوده انباشته‌شده متعاقب کاهش هوادهی است (۴۷).

- زیست‌پالایی توسط گیاهان (گیاه‌پالایی)

گیاه‌پالایی یک روش نوظهور زیست‌پالایی است که از گیاهان و ریشه‌های آن‌ها برای اصلاح خاک و آب آلوده استفاده می‌کند. این تکنیک بر استفاده از فعل و انفعالات گیاهی (فیزیکی، بیوشیمیایی، بیولوژیکی، شیمیایی و میکروبیولوژیکی) در مکان‌های آلوده برای کاهش اثرات سمی آلاینده‌ها متکی است. اکثر مطالعات تحقیقاتی گزارش کرده‌اند که در محل آلوده، مکانیسم حذف آلاینده‌ها توسط گیاهان شامل جذب آلاینده‌ها

باشند. عواملی مانند تقویت زیستی کنترل‌شده، تکمیل مواد مغذی، انتقال جرم، فراهمی زیستی آلاینده‌ها و شرایط واکنش بهینه، فناوری زیست‌پالایی بیوراکتور محور را کارآمدتر می‌سازد (۶۲ و ۶۱). روش بیوراکتور برای تصفیه خاک یا آب آلوده به آلاینده‌های آلی فرار مانند بنزن، تولوئن، اتیل بنزن و زایلن استفاده می‌شود. استفاده از بیوراکتور برای فرآیند زیست‌پالایی بسیار سودمندتر از فناوری‌های دیگر است زیرا می‌تواند پارامترهای فرآیند مورد نیاز برای واکنش‌های بیولوژیکی مورد استفاده در تجزیه زیستی آلاینده‌ها را کنترل، مدیریت و دست‌کاری کند.

تقویت زیستی کنترل‌شده، افزودن مواد مغذی، افزایش فراهمی زیستی آلاینده، و انتقال جرم (تماس بین آلاینده و میکروپ)، که از جمله عوامل محدود کننده فرآیند زیست‌پالایی هستند، می‌توانند به طور موثر در یک بیوراکتور ایجاد شوند، بنابراین زیست‌پالایی مبتنی بر بیوراکتور کارآمدتر می‌شود. کاربرد بیوراکتورهای مختلف برای فرآیند زیست‌پالایی منجر به حذف طیف گسترده‌ای از آلاینده‌ها از جمله هیدروکربن‌های نفتی کل و آروماتیک چند حلقه‌ای (۹۷-۸۲ درصد)، ۲،۴-دی‌کلروفلئوکسی استیک اسید (۱۰۰-۹۷ درصد)، نیتروژن کل (۵۳-۴۷ درصد)، نفتالین و نیتروژن کل (۹۳-۴۸ درصد)، کربوفوران (۹۷-۸۲ درصد) و آلکیل بنزن سولفونات خطی (۹۲/۹ درصد) شده است (۲۶).

- بیوفیلترها (پالایه‌های زیستی)

روش بیوفیلتر بیش‌تر برای حذف آلاینده‌های گازی استفاده می‌شود. در این فناوری از ستون‌های تعبیه‌شده

² Transitory

¹ Windrow

توسط یک فرآیند غیرفعال، انتقال آلاینده از ریشه به شاخه با جریان آوند چوبی و تجمع در شاخه می‌شود (۶۳). روش‌های زیست پالایی مبتنی بر پوشش گیاهی پتانسیل زیادی برای تجزیه، تجمع، بی‌حرکت کردن و تبدیل آلاینده‌های پایدار با عمل به‌عنوان یک پالایه زیستی و متابولیزه کردن آلاینده دارند. این روش به‌عنوان یک روش جایگزین نوآورانه و مقرون‌به‌صرفه برای تصفیه مکان‌های آلوده خطرناک در نظر گرفته می‌شود (۶۴). بسته به نوع آلاینده از قبیل آلاینده عنصری (فلزات سنگین سمی و رادیونوکلیدها) و آلی (هیدروکربن‌ها و ترکیبات کلردار) مکانیسم‌های متعددی (تجمع یا استخراج، تجزیه، تثبیت، تبخیر، تبدیل، فیلتراسیون و ترکیبی از این مکانیسم‌ها) در گیاه‌پالایی دخیل هستند آلاینده‌های عنصری عمدتاً با استخراج، تبدیل و جداسازی حذف می‌شوند. از سوی دیگر، آلاینده‌های آلی عمدتاً با تجزیه، اصلاح ریزوسپری، تثبیت و تبخیر حذف می‌شوند (۶۵-۲۶). همچنین معدنی‌سازی آلاینده‌ها در صورت استفاده از گیاهانی مانند بید و یونجه امکان‌پذیر است (۶۵ و ۶۴). اطلاعات دقیق در مورد دسته‌های مختلف فناوری گیاه‌پالایی در جدول (۴) ارائه شده است.

گیاه‌پالایی، یک فناوری باصرفه اقتصادی، زیست‌محیطی و علمی است که برای کشورهای درحال توسعه مناسب است و تجارت باارزشی به‌حساب می‌آید. متأسفانه علی‌رغم این پتانسیل، هنوز در برخی از کشورها مانند کشور ما به‌عنوان یک فناوری استفاده تجاری ندارد. گیاه‌پالایی با استفاده از مهندسی گیاهان سبز شامل گونه‌های علفی و چوبی برای برداشت مواد آلاینده از آب و خاک یا کاهش

خطرات آلاینده‌های محیط زیست نظیر فلزات سنگین، عناصر کمیاب، ترکیبات آلی و مواد رادیواکتیو، آفت‌کش‌ها، آلاینده‌های نفتی و مشتقات آن‌ها به‌کار برده می‌شود. مهم‌ترین ترکیبات معدنی آلاینده، فلزات سنگین بوده و میکروارگانسیم‌های خاک قادر به تجزیه آلاینده‌های آلی هستند، اما برای تجزیه میکروبی فلزات نیاز به آلی شدن یا تغییرات فلزی آن‌ها وجود دارد که امروزه از گیاهان برای این بخش استفاده می‌شود. گیاهانی که این عمل را انجام می‌دهند تجمع‌دهنده آلاینده^۱ نام دارند مانند خردل هندی، آفتابگردان، تنباکو، ذرت، شاهی یا ترتیزک. مهم‌ترین مزیت این روش این است که یک فناوری تمیز و مقرون‌به‌صرفه بوده که به محیط آسیب وارد نمی‌کند. در مقابل عیب اصلی آن نیاز به زمان طولانی برای از بین رفتن کل آلودگی است و نیز تحت شرایط نامساعد جوی و محیطی امکان عدم کارایی آن وجود دارد. کارایی روش‌های زیست پالایی مبتنی بر پوشش گیاهی در حذف طیف گسترده‌ای از آلاینده‌ها از جمله بنزین (۹۳/۵ درصد)، گازوئیل (۹۸-۹۰ درصد)، دی فنیل اترهای برومینه (۵۸/۲ درصد)، فلزات سنگین آهن، روی، کادمیوم، مس، بر و کروم (۹۹/۳ درصد)، PAHs (۵۸/۴۷ درصد)، بیس‌فنل‌های پلی‌کلرینه (۹۱/۵ درصد)، TPH (۸۷ درصد) و نانوذرات نقره و جیوه (۷۰-۲۰ درصد) گزارش شده است. (۶۶-۷۰).

استخراج گیاهی

این فناوری به‌عنوان روش انباشتگی گیاهی یا ریز انباشتگی گیاه‌پالایی نیز شناخته می‌شود. در این روش، گیاهان آلاینده‌ها را در ریشه، شاخه و برگ خود انباشت می‌کنند و توده‌ای از گیاهان حاوی آلاینده‌ها

¹ Hyperaccumulator Plants

فلزات) تولید می‌کنند که بیش‌تر برای دفع و بازیافت حمل می‌شوند (۶۹).

- تجزیه گیاهی یا تجزیه ریزوسفری

در این روش، آلاینده‌ها با فعالیت آنزیم‌ها و پروتئین‌های تولیدشده توسط گیاهان و میکروب‌های خاک در ریزوسفر تجزیه می‌شوند. این فناوری شامل رابطه همزیستی بین گیاهان و میکروب‌ها می‌شود که در آن گیاهان مواد مغذی را برای فرآیند تجزیه زیستی در اختیار میکروب‌ها قرار می‌دهند و میکروب‌های خاک در ازای آن محیط مناسبی را برای فرآیند تجزیه فراهم می‌کنند (۷۱).

- تثبیت گیاهی

در این فناوری، به واسطه تشکیل توده گیاهی پایدار با آلاینده، تحرک آلاینده‌ها در خاک و آب توسط گیاهان کاهش می‌یابد و در نتیجه از حرکت بیش‌تر آلاینده به جو جلوگیری می‌شود (۶۹).

- ریزوفیلتراسیون

ریزوفیلتراسیون بسیار شبیه به روش استخراج گیاهی است اما شامل تصفیه آب‌های زیرزمینی آلوده به‌جای خاک آلوده است. در این روش ابتدا ریشه گیاه آلاینده را جذب کرده و سپس یا در سطح ریشه جذب می‌شود و یا توسط ریشه جذب می‌شود. برای استفاده از گیاه در ریزوفیلتراسیون، ابتدا گیاه باید در حضور یک آلاینده سازگار شود و سپس گیاه سازگار شده برای اهداف زیست‌پالایی با کاشت آن در آب‌های زیرزمینی آلوده که ریشه‌های گیاه آلاینده را با آب آلوده جذب می‌کنند، استفاده می‌شود. هنگامی که ریشه‌های گیاه با آلاینده اشباع می‌شود، پس از برداشت به‌طور ایمن دفع می‌شوند و محل آلوده به‌طور مکرر برای حذف کامل آلاینده‌ها تصفیه می‌شود. این روش گیاه‌پالایی عموماً برای حذف فلزات سنگین از آب‌های زیرزمینی، تالاب‌های طبیعی و مصب‌های آلوده به فلزات استفاده می‌شود (۷۱ و ۶۳).

جدول (۴): خلاصه‌ای از انواع فرایندهای گیاه‌پالایی (۲۱)

فرایند	مکانیسم گیاه	محیط سطحی
استخراج گیاهی جذب و تغلیظ فلزات از طریق جذب مستقیم به بافت گیاهان و همراه با حذف متعاقب گیاهان	خاک‌ها	
تبدیل گیاهی	جذب و تجزیه ترکیبات آلی توسط گیاه	آب‌های سطحی، آب‌های زیرزمینی
تثبیت گیاهی	ترشحات ریشه باعث رسوب فلز و در دسترس شدن کم‌تر می‌شود	خاک، آب زیرزمینی، باطله معدن
تجزیه گیاهی	بهبود تجزیه میکروبی در ریزوسفر	خاک، آب زیرزمینی داخل ریزوسفر
ریزوفیلتراسیون	جذب فلزات به ریشه گیاه	آب سطحی و آب پمپاژ شده
تبخیر گیاهی	گیاهان سلنیوم، جیوه و هیدروکربن‌های فرار را تبخیر می‌کنند	خاک‌ها و آب‌های زیرزمینی
پوشش گیاهی ^۱	آب باران توسط گیاهان برای جلوگیری از شست‌شوی آلاینده‌ها از محل‌های دفع تبخیر می‌شود.	خاک‌ها

^۱ Vegetative Cap

پایش و نظارت بر فناوری زیست پالایی

فرآیند تصفیه زیستی را می توان به طور غیرمستقیم با اندازه گیری پتانسیل اکسیداسیون - احیا یا ردوکس در خاک و آب های زیرزمینی، همراه با pH، دما، محتوای اکسیژن، غلظت گیرنده / دهنده الکترون و غلظت محصولات تجزیه (به عنوان مثال دی اکسید کربن) پایش کرد (۱۶).

جنبه های آتی فناوری زیست پالایی

از بحث جامع بالا در مورد زیست پالایی، به راحتی می توان فهمید که فناوری های زیست پالایی درجا و دگرجا به طور گسترده برای به حداقل رساندن مواد زائد و پاک سازی خاک و آب آلوده استفاده می شود. پیشرفت های بیش تر در فناوری های ژنومی، مولکولی و بیوتکنولوژیکی ممکن است به گسترش رویکردهای زیست پالایی کمک کند. علیرغم استفاده از فناوری های زیست پالایی منفرد، استفاده از فناوری های مختلف زیست پالایی به طور هم زمان می تواند راه حلی کارآمدتر، امیدوارکننده و مقرون به صرفه برای مشکل آلودگی باشد. کاربرد زیست پالایی با واسطه بیوسورفکتانت برای تمیز کردن مکان های آلوده به هیدروکربن ها به منظور بهبود حلالیت و فراهمی زیستی آلاینده ها برای میکروب ها امروزه مورد توجه قرار گرفته است. این می تواند به دلیل هزینه پایین تولید بیوسورفکتانت با استفاده از میکروب های تکمیل شده با پسماندهای کشاورزی و طبیعت زیست تخریب پذیر امکان پذیر باشد. علاوه بر این، با کمک فناوری های تقویت زیستی و تحریک زیستی، پتانسیل تجزیه زیستی میکروب های بومی را

می توان افزایش داد. از طرف دیگر، فناوری های مولکولی پیشرفته در حال ظهور (متازنومیکس، ژنومیکس، متابولومیک، رونویسی و پروتئومیکس) مشکلات مربوط به کشت میکروبی را حل کرده است و دانش بهتری از تنوع میکروبی و عملکرد آن ها و مسیرهای متابولیک و کاتابولیک موجود در یک سایت های زیست محیطی آلوده ارائه کرده است که به کاهش بیش تر آلاینده های نوظهور و مشکلات مرتبط کمک می کند. فناوری نوظهور جدید، مانند سلول های سوختی میکروبی تلقیح شده با میکروب ها (گونه سودوموناس^۱ و گونه شوانلا^۲)، ممکن است به عنوان کاندیدهای بالقوه برای زیست پالایی پلی آروماتیک ها و مکان های آلوده به هیدروکربن ها (فناوریانترن^۳) در نظر گرفته شود. همچنین استفاده از میکروب های دست کاری شده ژنتیکی در زیست پالایی، یک فناوری امیدوارکننده و پیشرفته است که با استفاده از مسیرهای کاتابولیک جدید و کارآمد، تجزیه مؤثر یک آلاینده مقاوم را تسهیل می کند، دامنه بستر برای فرآیند تجزیه را افزایش می دهد و پایداری فعالیت تجزیه میکروب ها را افزایش می دهد. پیشرفت در علم و فناوری نانو منجر به تولید نانو مواد متعددی شده است که به عنوان کاتالیزور زیستی عمل می کنند و سطح را بهبود می بخشد و انرژی فعال سازی را برای فرآیند تجزیه زیستی کاهش می دهند (۷۳ و ۷۲ و ۲۱).

نتیجه گیری

این مقاله ایده ای از زیست پالایی، اهداف، اصول و عوامل مؤثر، استراتژی ها، انواع، نظارت و پایش، مزایا

¹ Pseudomonas

² Shewanella

³ Phenanthrene

گران‌تر هستند. با این وجود، می‌توان از آن‌ها برای تصفیه طیف وسیعی از آلاینده‌ها به صورت کنترل‌شده استفاده کرد. در مقابل، فناوری‌های در محل هیچ هزینه اضافی نسبت به حفاری ندارند. با این حال، هزینه نصب تجهیزات در محل، همراه با ناتوانی در تجسم و کنترل مؤثر سطح زیرسطحی سایت آلوده ممکن است برخی از فناوری‌های زیست‌پالایی در محل را ناکارآمد کند. در نتیجه، ظاهراً هزینه پاک‌سازی، عامل اصلی در تعیین و انتخاب روش زیست‌پالایی برای استفاده در هر مکان آلوده نیست. مشخصات زمین‌شناسی سایت (های) آلوده شامل نوع خاک، عمق و نوع آلاینده، موقعیت مکانی سایت آلوده نسبت به محل سکونت انسان و ویژگی‌های عملکردی هر فناوری زیست‌پالایی باید در تصمیم‌گیری مناسب‌ترین و کارآمدترین روش برای تصفیه مؤثر سایت‌های آلوده گنجانده شود.

تعارض منافع

نویسندگان هیچگونه تعارض منافی برای اعلام ندارند.

منابع

- [1] Kuppan, N., Padman, M., Mahadeva, M., Srinivasan, S., Devarajan, R., 2024, A comprehensive review of sustainable bioremediation techniques: Eco friendly solutions for waste and pollution management. *Waste Management Bulletin*, 2, 154.
- [2] Sharma, I., 2020, Bioremediation techniques for polluted environment: Concept, advantages, limitations, and prospects. In: *Trace metals in the environment-new approaches and recent advances*, IntechOpen, pp. 221-236.
- [3] Demnerová, K., Mackova, M., Speváková, V., Beranova, K., Kochánková, L., Lovecká, P., Ryslavá, E., Macek, T., 2005, Two approaches to biological decontamination of groundwater and soil polluted by aromatics-characterization

و چالش‌های پیش روی آن و جنبه‌های آتی فناوری زیست‌پالایی را ارائه می‌دهد. زیست‌پالایی گزینه بسیار کارآمد و جذابی برای اصلاح، پاک‌سازی، مدیریت و فناوری بازیابی برای تصفیه محیط‌های آلوده از طریق فعالیت میکروبی است. سرعت تجزیه مواد زائد و آلاینده‌ها در رقابت با عوامل بیولوژیکی، تأمین ناکافی مواد مغذی ضروری، شرایط محیطی نامطلوب (هوادهی، رطوبت، pH، دما) و پایین بودن فراهمی زیستی آلاینده تعیین می‌شود. با توجه به این عوامل، تجزیه زیستی در شرایط طبیعی موفقیت‌آمیز نبوده و منجر به کم‌تر شدن مطلوبیت می‌شود. زیست‌پالایی تنها زمانی می‌تواند مؤثر باشد که شرایط محیطی اجازه رشد و فعالیت میکروبی را بدهد. بدیهی است که فناوری زیست‌پالایی در مقایسه با سایر رویکردهای فیزیکی و شیمیایی یک رویکرد اصلاحی امیدوارکننده، سازگار، در حال رشد، کارآمد و دوستدار محیط زیست است و در حال هدایت مسیری به سمت مراتع سرسبزتر است. همچنین، مکانیسم، اصول و اثربخشی هر دو روش زیست‌پالایی، یعنی زیست‌پالایی درجا و دگرجا، در تصفیه بسیاری از مکان‌های آلوده موفقیت‌آمیز بوده است. زیست‌پالایی در سایت‌های مختلف در سطح جهان با درجات مختلف موفقیت مورد استفاده قرار گرفته است و محبوبیت روزافزون آن در طول زمان مشهود بوده و به‌طور کلی دارای مزایای بیشتری است. با این حال، مهم‌ترین گام برای یک زیست‌پالایی موفق، شناسایی ویژگی‌های مکان آلوده است که به ایجاد مناسب‌ترین و امکان‌پذیرترین فناوری زیست‌پالایی (درجا یا دگرجا) کمک می‌کند. فناوری‌های زیست‌پالایی دگرجا به دلیل هزینه‌های اضافی مربوط به حفاری و حمل‌ونقل،

- designing strategies of bioremediation, In: *Bioremediation Science*, 1st Edition, CRC Press, pp. 37-56.
- [14] Smriti, K., 2023, Bioremediation: Factors, types, advantages, disadvantages, *Microbe Notes*, (Available online: microbenotes.com/bioremediation-types-factors).
- [15] Mishra, M., Singh, S.K., Kumar, A., 2021, Environmental factors affecting the bioremediation potential of microbes, In: *Microbe Mediated Remediation of Environmental Contaminants*, Woodhead Publishing, pp. 47-58.
- [16] Kensa, V.M., 2011, Bioremediation-an overview, *Journal of Industrial Pollution Control*, 27, 161.
- [17] Montagnoli, R.N., Lopes, P.R.M., Bidoia, E.D., 2015, Assessing *Bacillus subtilis* biosurfactant effects on the biodegradation of petroleum products, *Environmental Monitoring and Assessment*, 187, 4116.
- [18] Sharma, S., 2012, Bioremediation: Features, strategies and applications, *Asian Journal of Pharmacy and Life Science*, 2, 202.
- [19] Barba, S., Villaseñor, J., Rodrigo, M.A., Cañizares, P., 2021, Biostimulation versus bioaugmentation for the electro-bioremediation of 2, 4-dichlorophenoxyacetic acid polluted soils, *Journal of Environmental Management*, 277, 111424.
- [20] Singh, A., Kumar, V., Srivastava, J.N., 2013, Assessment of bioremediation of oil and phenol contents in refinery waste water via bacterial consortium, *Journal of Petroleum & Environmental Biotechnology*, 4, 1000145.
- [21] Tyagi, B., Kumar, N., 2021, Bioremediation: Principles and applications in environmental management, In: *Bioremediation for Environmental Sustainability*, Elsevier, pp. 3-28.
- [22] Abatenh, E., Gizaw, B., Tsegaye, Z., Wassie, M., 2017, The role of microorganisms in bioremediation-A review, *Open Journal of Environmental Biology*, 2, 038.
- [23] Boopathy, R., 2000, Factors limiting bioremediation technologies, *Bioresource Technology*, 74, 63.
- [24] Harekrushna, S., Kumar, D.C., 2012, A review on: Bioremediation, *International Journal of Research in Chemistry and Environment*, 2, 13.
- of microbial populations, *International Microbiology*, 8, 205.
- [4] Tang, C.Y., Fu, Q.S., Criddle, C.S., Leckie, J.O., 2007, Effect of flux (transmembrane pressure) and membrane properties on fouling and rejection of reverse osmosis and nanofiltration membranes treating perfluorooctane sulfonate containing wastewater, *Environmental Science & Technology*, 41, 2008.
- [5] Chen, B.Y., Ma, C.-M., Han, K., Yueh, P.-L., Qin L.-J., Hsueh C.-C., 2016, Influence of textile dye and decolorized metabolites on microbial fuel cell-assisted bioremediation, *Bioresource Technology*, 200, 1033.
- [6] Aryal, S., 2023, Introduction to bioremediation, *Microbe Notes*. (Available online: microbenotes.com/bioremediation).
- [7] Malik, S., Dhasmana, A., Kishore, S., Kumari, M., 2022, Microbes and microbial enzymes for degradation of pesticides. In: *Bioremediation and Phytoremediation Technologies in Sustainable Soil Management*, Apple Academic Press, pp. 95-127.
- [8] Patowary, R., Devi, A., Mukherjee, A.K., 2023, Advanced bioremediation by an amalgamation of nanotechnology and modern artificial intelligence for efficient restoration of crude petroleum oil-contaminated sites: a prospective study, *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 74459.
- [9] Ren, X., Zeng, G., Tang, L., Wang, J., Wan, J., Wang, J., Deng, Y., Liu, Y., Peng, B., 2018, The potential impact on the biodegradation of organic pollutants from composting technology for soil remediation, *Waste Management*, 72, 138.
- [10] Jain, P.K., Bajpai, V., 2012, Biotechnology of bioremediation-a review, *International Journal of Environmental Sciences*, 3, 535.
- [11] Lutes, C., 2007, In-situ substrate addition to create reactive zones for treatment of chlorinated aliphatic hydrocarbons, ESTCP Cost and Performance Report. (Available online: <https://apps.dtic.mil/sti/citations/ADA478051>).
- [12] International Centre for Soil and Contaminated Sites, 2006, *Manual for Biological Remediation Techniques*, pp. 9-18.
- [13] Prasad, S., Kannojiya, S., Kumar, S., Yadav, K.K., Kundu, M., Rakshit, A., 2021, Integrative approaches for understanding and

- hydrocarbon contaminants in soil, Kathmandu University Journal of Science, Engineering and Technology, 8, 164.
- [36] Adams, G.O., Fufeyin, P.T., Okoro, S.E., Ehinomen, I., 2015, Bioremediation, biostimulation and bioaugmentation: A review, International Journal of Environmental Bioremediation & Biodegradation, 3, 28.
- [37] Naik, M.G., Duraphe, M.D., 2012, Review paper on-parameters affecting bioremediation, International Journal of Life Science & Pharma Research, 2, 77.
- [38] Frutos, F.J.G., Escolano, O., García, S., Babín, M., Fernández, M.D., 2010, Bioventing remediation and ecotoxicity evaluation of phenanthrene-contaminated soil, Journal of Hazardous Materials, 183, 806.
- [39] Agarry, S., Latinwo, G.K., 2015, Biodegradation of diesel oil in soil and its enhancement by application of bioventing and amendment with brewery waste effluents as biostimulation-bioaugmentation agents, Journal of Ecological Engineering, 16, 82.
- [40] Bala, S., Garg, D., Thirumalesh, B.V., Sharma, M., Sridhar, K., Inbaraj, B.S., Tripathi, M., 2022, Recent strategies for bioremediation of emerging pollutants: a review for a green and sustainable environment, Toxics, 10, 484.
- [41] Tong, W., 2018, Groundwater hydrology, soil and groundwater contamination assessment and monitoring, In: Fundamentals of Environmental Site Assessment and Remediation, 1st Edition, CRC Press, pp. 70–99
- [42] Kao, C.M., Chen, C.Y., Chen, S.C., Chien, H.Y., Chen, Y.L., 2008, Application of in situ biosparging to remediate a petroleum-hydrocarbon spill site: Field and microbial evaluation, Chemosphere, 70, 1492.
- [43] Atlas, R.M., Philp, J.C., 2005, Bioremediation. Applied microbial solutions for real-world environmental cleanup, 1st Edition, American Society of Microbiology.
- [44] Maitra, S., 2019, Permeable reactive barrier: A technology for groundwater remediation - a mini review, Research Journal of Life Sciences, Bioinformatics, Pharmaceutical and Chemical Sciences, 5, 203.
- [45] Emami, S., Pourbabae, A.A., Alikhani, H.A., 2012, Bioremediation principles and techniques on petroleum hydrocarbon contaminated soil, Technical Journal of Engineering and Applied Sciences, 2, 320.
- [25] Kumar, V., Shahi, S.K., Singh, S., 2018, Bioremediation: An eco-sustainable approach for restoration of contaminated sites, In: Microbial Bioprospecting for Sustainable Development, Springer, pp. 115-136.
- [26] Azubuiké, C.C., Chikere, C.B., Okpokwasili, G.C., 2016, Bioremediation techniques—classification based on site of application: Principles, advantages, limitations and prospects, World Journal of Microbiology and Biotechnology, 32, 180.
- [27] Mulligan, C.N., Yong, R.N., 2004, Natural attenuation of contaminated soils, Environment International, 30, 587.
- [28] Li, C.-H., Wong, Y.-S., Tam, N.F.-Y., 2010, Anaerobic biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons with amendment of iron(III) in mangrove sediment slurry, Bioresource Technology, 101, 8083.
- [29] Singh, S.P., Garima, T., 2015, Application of bioremediation on solid waste management: A review, Environmental Science: An Indian Journal, 10, 11.
- [30] Niu, G.L., Zhang, J.J., Zhao, S., Liu, H., Boon, N., Zhou, N.Y., 2009, Bioaugmentation of a 4-chloronitrobenzene contaminated soil with *Pseudomonas putida* ZWL73, Environmental Pollution, 157, 763.
- [31] Malik, Z.A., Ahmed, S., 2012, Degradation of petroleum hydrocarbons by oil field isolated bacterial consortium, African Journal of Biotechnology, 11, 650.
- [32] Alwan, A.H., Fadil, S.M., Khadair, S.H., Haloub, A.A., Mohammed, D.B., Salah, M.F., Sabbar, S.S., Mousa, N.K., Salah, Z.A., 2013, Bioremediation of the water contaminated by waste of hydrocarbon by use *Ceratophyllaceae* and *Potamogetonaceae* plants, Journal of Genetic and Environmental Resources Conservation, 1, 106.
- [33] Gomez, F., Sartaj, M., 2014, Optimization of field scale biopiles for bioremediation of petroleum hydrocarbon contaminated soil at low temperature conditions by response surface methodology (RSM), International Biodeterioration & Biodegradation, 89, 103.
- [34] Sayler, G.S., Ripp, S., 2000, Field applications of genetically engineered microorganisms for bioremediation processes, Current Opinion in Biotechnology, 11, 286.
- [35] Thapa, B., Kc, A., Ghimire, A., 2012, A review on bioremediation of petroleum

- [56] Naeem, U., Qazi, M.A., 2020, Leading edges in bioremediation technologies for removal of petroleum hydrocarbons, *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 27370.
- [57] Jaain, R., Patel, A., 2019, Bioremediation of Gurugram–Faridabad dumpsite at Bandhwari, In: *Waste Valorisation and Recycling*, Springer, pp. 433-440.
- [58] Oualha, M., Al-Kaabi, N., Al-Ghouti, M., Zouari, N., 2019, Identification and overcome of limitations of weathered oil hydrocarbons bioremediation by an adapted *Bacillus sorensis* strain, *Journal of Environmental Management*, 250, 109455.
- [59] Volpe, A., D'Arpa, S., Del Moro, G., Rossetti, S., Tandoi, V., Uricchio, V.F., 2012, Fingerprinting hydrocarbons in a contaminated soil from an Italian natural reserve and assessment of the performance of a low-impact bioremediation approach, *Water, Air, & Soil Pollution*, 223, 1773.
- [60] Silva-Castro, G.A., Uad, I., González-López, J., Fandiño, C.G., Toledo, F.L., Calvo, C., 2012, Application of selected microbial consortia combined with inorganic and oleophilic fertilizers to recuperate oil-polluted soil using land farming technology, *Clean Technologies and Environmental Policy*, 14, 719.
- [61] Williams, J., 2006, Bioremediation of contaminated soils: A comparison of in situ and ex situ techniques, *Engineering Biology*.
- [62] Mohan, S.V., Sirisha, K., Rao, N.C., Sarma, P.N., Reddy, S.J., 2004, Degradation of chlorpyrifos contaminated soil by bioslurry reactor operated in sequencing batch mode: bioprocess monitoring, *Journal of Hazardous Materials*, 116, 39.
- [63] San Miguel, A., Ravanel, P., Raveton, M., 2013, A comparative study on the uptake and translocation of organochlorines by *Phragmites australis*, *Journal of Hazardous Materials*, 244-245, 60.
- [64] Meagher, R.B., 2000, Phytoremediation of toxic elemental and organic pollutants, *Current Opinion in Plant Biology*, 3, 153.
- [65] Kuiper, I., Lagendijk, E.L., Bloemberg, G.V., Lugtenberg, B.J., 2004, Rhizoremediation: A beneficial plant-microbe interaction, *Molecular Plant-Microbe Interactions*, 17, 6.
- [46] Bewley, R.J.F., Hockin, S., 2011, Contaminated soils and bioremediation: Creation and maintenance of inner space, In: *The Architecture and Biology of Soils: Life in Inner Space*, 1st Edition, Wallingford UK: CABI, pp. 196-215.
- [47] Dias, R.L., Ruberto, L., Calabró, A., Balbo, A.L., Del Panno, M.T., Mac Cormack, W.P., 2015, Hydrocarbon removal and bacterial community structure in on-site biostimulated biopile systems designed for bioremediation of diesel-contaminated Antarctic soil, *Polar Biology*, 38, 677.
- [48] Whelan, M.J., Coulon, F., Hince, G., Rayner, J., McWatters, R., Spedding, T., Snape, I., 2015, Fate and transport of petroleum hydrocarbons in engineered biopiles in polar regions, *Chemosphere*, 131, 232.
- [49] Garima, T., Singh, S.P., 2014, Application of bioremediation on solid waste management: A review, *Journal of Bioremediation & Biodegradation*, 5, 248.
- [50] Rodríguez-Rodríguez, C.E., Marco-Urrea, E., Caminal, G., 2010, Degradation of naproxen and carbamazepine in spiked sludge by slurry and solid-phase *Trametes versicolor* systems, *Bioresource Technology*, 101, 2259.
- [51] Sanscartier, D., Zeeb, B., Koch, I., Reimer, K., 2009, Bioremediation of diesel-contaminated soil by heated and humidified biopile system in cold climates, *Cold Regions Science and Technology*, 55, 167.
- [52] Chemlal, R., Abdi, N., Lounici, H., Drouiche, N., Pauss, A., Mameri, N., 2013, Modeling and qualitative study of diesel biodegradation using biopile process in sandy soil, *International Biodeterioration & Biodegradation*, 78, 43.
- [53] Delille, D., Duval, A., Pelletier, E., 2008, Highly efficient pilot biopiles for on-site fertilization treatment of diesel oil-contaminated sub-Antarctic soil, *Cold Regions Science and Technology*, 54, 7.
- [54] Arora, S., Saxena, S., Sutaria, D., Sethi, J., 2022, Bioremediation: An ecofriendly approach for the treatment of oil spills, In: *Advances in Oil-Water Separation*, Elsevier, pp. 353-373.
- [55] Ojha, N., Karn, R., Abbas, S., Bhugra, S., 2021, Bioremediation of industrial wastewater: A review, In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 796, 012012.

- [66] Moosavi, S.G., Seghatoleslami, M.J., 2013, Phytoremediation: A review, *Advance in Agriculture and Biology*, 1, 5.
- [67] Etim, E.E., 2012, Phytoremediation and its mechanisms: A review, *International Journal of Environment and Bioenergy*, 2, 120.
- [68] Vasavi, A., Usha, R., Swamy, P.M., 2010, Phytoremediation—an overview review, *Journal of Industrial Pollution Control*, 26, 83.
- [69] Ekta, P., Modi, N.R., 2018, A review of phytoremediation, *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 7, 1485.
- [70] Yadav, K.K., Gupta, N., Kumar, A., Reece, L.M., Singh, N., Rezaia, S., Khan, S.A., 2018, Mechanistic understanding and holistic approach of phytoremediation: A review on application and future prospects, *Ecological Engineering*, 120, 274.
- [71] Kristanti, R.A., Ngu, W.J., Yuniarto, A., Hadibarata, T., 2021, Rhizofiltration for removal of inorganic and organic pollutants in groundwater: A review, *Biointerface Research in Applied Chemistry*, 11, 12326.
- [72] Paul, D., Pandey, G., Pandey, J., Jain, R.K., 2005, Accessing microbial diversity for bioremediation and environmental restoration, *Trends in Biotechnology*, 23, 135.
- [73] Vishwakarma, G.S., Bhattacharjee, G., Gohil, N., Singh, V., 2020, Current status, challenges and future of bioremediation, In: *Bioremediation of Pollutants: From Genetic Engineering to Genome Engineering*, Elsevier, pp. 403-415.

“Review article”

Bioremediation technology: A reliable and eco-friendly approach for the restoration of polluted environments

Mohammad Safari¹, Nasim Mosakhani², Ahmad Asl Hashemi³, Gholamhossein Safari^{3,4*}

¹Faculty of Medicine, Islamic Azad University, Kerman Branch, Kerman, Iran

²Research Committee, Tabriz University of Medical Sciences, Tabriz, Iran

³Department of Environmental Health Engineering, Faculty of Health, Tabriz University of Medical Sciences, Tabriz, Iran

⁴Health & Environment Research Center, Tabriz University of Medical Sciences, Tabriz, Iran

*Corresponding author: hsafari13@yahoo.com

(Received: 26 November 2024, Accepted: 25 December 2024)

Abstract

Environmental pollution has escalated over the past few decades due to the rise in anthropogenic activities. Global industrialization and modern agricultural practices have led to the emergence of pollutants such as hydrocarbons, pesticides, and heavy metals. Bioremediation technology is a key strategy for addressing the diverse challenges posed by environmental pollution, leveraging the capabilities of microorganisms to clean and protect ecosystems and remove contaminants from polluted environments. Bioremediation is a process that involves the reduction, removal, modification, and transformation of pollutants in natural environments such as soil, sediments, air, and water using microorganisms, fungi, plants, or their enzymes in order to restore the damaged environment to its original conditions. Bioremediation technologies are broadly categorized into in-situ and ex-situ methods. In-situ bioremediation is dedicated to the treatment of pollutants at the contaminated site, while ex-situ bioremediation involves the collection and transfer of contaminated materials to another location for treatment. In-situ bioremediation methods include biosparging, bioventing, biostimulation, bioslurping, bioaugmentation, and phytoremediation. On the other hand, ex-situ methods include land farming, composting, biopiles, biofilters, bioreactors, and windrow methods. Despite the numerous advantages of this technology, such as sustainability, low cost, and environmental compatibility, bioremediation faces significant challenges including biological specificity, environmental variability, site heterogeneity, scalability issues, and regulatory barriers. Overcoming these obstacles requires interdisciplinary research, development, and management. This paper provides a comprehensive overview of bioremediation, its goals, principles, methods, influencing factors, benefits, and the challenges it faces, as well as future prospects for this technology, emphasizing the need for ongoing research to optimize and expand its applications.

Conflict of interest: None declared.

Keywords: Environmental pollution, Microorganisms, Biodegradation, In-situ bioremediation, Ex-situ bioremediation



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

دوره ۱، شماره ۳، پیاپی ۳
پاییز ۱۴۰۳، صفحات ۲۹-۴۵

"مقاله مروری"

طراحی فوتوکاتالیست‌های چندمنظوره با $g-C_3N_4$ و کاربردهای آن در فناوری‌های پایدار

زهرا محمدپور کوسه‌لر^۱، زهره قاضی طباطبایی^{۲*}

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه شیمی، واحد اهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اهر، ایران

۲. استادیار گروه شیمی، واحد اهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اهر، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: zghazitabatabaei@yahoo.com

(دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۹/۰۸، پذیرش نهایی: ۱۴۰۳/۰۹/۱۹)

چکیده

فوتوکاتالیست‌های ناهمگن در تبدیل و ذخیره انرژی، در سوخت‌های خورشیدی پایدار و سبز و همچنین در بسیاری از حوزه‌های زیست‌محیطی به‌عنوان یک فناوری نوین به‌کار می‌روند. فوتوکاتالیست‌های نیتريد کربن گرافیتی ($g-C_3N_4$) به دلیل ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی، نوری و الکتریکی منحصر به فرد خود، طیف خاصی از فوتوکاتالیست‌های ناهمگن را تشکیل می‌دهند. در این مطالعه، مکانیسم‌های اصلی این فوتوکاتالیست‌ها، مزایا، چالش‌ها و طراحی فوتوکاتالیست‌های مبتنی بر $g-C_3N_4$ مورد بررسی قرار گرفت. همچنین، خواص ساختاری، ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی سطح، پایداری سطح، همچنین خواص الکتروشیمیایی، فوتوالکتروشیمیایی و نوری آن‌ها به تفصیل بررسی شد. همچنین، کاربردهای مهمی نظیر تخریب آلاینده‌ها، کاهش دی‌اکسید کربن، برخی تبدیلات آلی و گندزدایی نیز مورد توجه قرار گرفت. با توجه به پیشرفت‌های برجسته این حوزه، انتظار می‌رود که فرصت‌های جدیدی برای طراحی و ساخت فوتوکاتالیست‌های موثر مبتنی بر $g-C_3N_4$ برای کاربردهای مختلف فراهم شود.

واژه‌های کلیدی: نیتريد کربن گرافیتی، فوتوکاتالیست ناهمگن، فناوری‌های پایدار، طراحی فوتوکاتالیست

مقدمه

حال، شکاف باند بزرگ فاز آناتاز ($3/2 \text{ eV}$) استفاده از طیف وسیع نور خورشید را محدود کرده و تنها ۴ درصد از طیف ورودی نور خورشید را شامل می‌شود که عمدتاً نور ماوراء بنفش است. این امر منجر به کاهش قابل توجهی در بازده کوانتومی استفاده از طیف‌های خورشیدی می‌شود. به منظور افزایش کارایی فوتوکاتالیستی تیتانیا در زیر نور مرئی (حدود ۴۳ درصد از نور خورشید)، استراتژی‌های مختلفی از جمله دوپینگ، حساس‌سازی سطح، ایجاد نانوساختار، ایجاد نقص یا لایه‌های بی‌نظمی، بارگذاری کاتالیزورهای کمکی و جفت شدن با کربن به کار رفته است (۱۱). برای مقابله با این چالش‌ها، جستجوی مواد نیمه‌رسانای جدید مبتنی بر نور مرئی و ساختن سیستم‌های بسیار کارآمد برای تامین انرژی و اصلاح محیط بسیار ضروری است. نیتريد کربن گرافیتی ($g-C_3N_4$)، به عنوان یک نیمه‌هادی پلیمری بدون فلز، دارای خواص الکتریکی، نوری، ساختاری و فیزیکوشیمیایی منحصر به فردی است که آن را به یک نانوساختار چندمنظوره برای کاربردهای الکترونیکی، کاتالیزوری و انرژی تبدیل می‌کند (۱۲). تحقیقات گسترده در چند دهه اخیر، ترکیبات مبتنی بر $g-C_3N_4$ را به عنوان ماده‌ای ایده‌ال، برای انواع کاربردهای فوتوکاتالیستی انرژی و محیطی، مانند کاهش و اکسیداسیون فوتوکاتالیستی آب، تخریب آلاینده‌ها و کاهش دی‌اکسید کربن نشان می‌دهد (۱۳)، به طوری که $g-C_3N_4$ نسبت به فوتوکاتالیست TiO_2 به عنوان ماده‌ای پایدار در زمینه فوتوکاتالیستی تبدیل شده است. امروزه، پیشرفت در سنتز فوتوکاتالیست‌های مبتنی بر

امروزه در میان امکانات مختلف برای کشف منابع و فناوری‌های جدید انرژی پایدار، فناوری فوتوکاتالیستی به عنوان یکی از امیدوارکننده‌ترین فناوری‌های برداشت، تبدیل و ذخیره مستقیم انرژی خورشیدی به منظور تولید انرژی پایدار و سبز و همچنین در زمینه‌های گسترده‌ای از کاربردهای محیط‌زیستی شناخته می‌شود. در سال ۱۹۷۲، تولید فوتوالکتروشیمیایی H_2 از تجزیه آب با استفاده از یک سلول $n-TiO_2$ متصل به پلاتین برای اولین بار توسط فوجیشیما^۱ و هوندا^۲ گزارش شد (۱). متعاقباً، بارد^۳ اصل اساسی فوتوالکتروشیمیایی تجزیه آب را به سیستم‌های فوتوکاتالیستی ناهمگن با ذرات نیمه‌هادی معلق در آب گسترش داد (۲). از آن زمان، علاقه فزاینده‌ای به استفاده از نیمه‌هادی‌ها به عنوان فوتوکاتالیست برای کاربردهای مختلف مانند تجزیه آب (۳)، اصلاح محیطی (۴)، کاهش CO_2 (۵)، ضد عفونی (۶) و تبدیلات آلی انتخابی (۷) وجود داشته است. در طول چند دهه گذشته، مواد نیمه‌هادی متنوعی مانند Ta_3N_5 ، $BiVO_4$ ، CdS ، $SrTiO_3$ ، TiO_2 ، Ag_3PO_4 ، $g-C_3N_4$ و مجموعه‌های نانوساختار آن‌ها به طور گسترده به عنوان فوتوکاتالیست برای مهار مستقیم انرژی خورشیدی در واکنش‌های اکسایش-کاهش مختلف مورد استفاده قرار گرفته‌اند (۸ و ۹). تیتانیوم‌دی‌اکسید (TiO_2) به عنوان یک فوتوکاتالیست طلایی یکی از پرکاربردترین فوتوکاتالیست‌های ناهمگن، به دلیل پایداری شیمیایی، بی‌اثر و غیرسمی بودن و هزینه کم تولید شناخته شده است (۱۰). با این

¹ Fujishima, A.

² Honda, K.

³ Bard, A. J.

(مرحله ۲)، جداسازی و انتقال بار (مراحل ۳، ۴ و ۵) و واکنش‌های الکتروکاتالیستی سطحی (مراحل ۶ و ۷) می‌شود. فرآیند جذب نور (مرحله ۱) به شدت به ساختار سطح و فوتوکاتالیست‌ها بستگی دارد. از آنجایی که سطح صاف و هموار $g-C_3N_4$ دو بعدی برای جذب نور نامطلوب است معمولاً می‌توان آن را با ساختارهای ماکروپورس یا مزوپورس بهبود داد (۲۱). مرحله برانگیختگی بار (مرحله ۲) در یک نیمه‌رسانا به ساختارهای الکترونیکی خاص آن مرتبط است. به‌طور کلی، یک الکترون در نوار ظرفیت^۱ (VB) می‌تواند تحت تابش نور با انرژی بیشتر یا برابر با انرژی باند شکاف^۲ (Eg) آن، به نوار هدایتی^۳ (CB) منتقل شود و در نتیجه یک حفره مثبت در نوار ظرفیت ایجاد کند. $g-C_3N_4$ دارای باند شکاف متوسط (۲/۷ eV) است که کاربرد وسیع آن را در فوتوکاتالیست‌های نور مرئی نشان می‌دهد (۲۲). اما برای دستیابی به استفاده بیشتر از نور مرئی، باند شکاف $g-C_3N_4$ باید از طریق بهینه‌سازی، ایجاد نقص و سایر استراتژی‌های حساس‌سازی ممکن، بیشتر کاهش یابد. باز ترکیب نامطلوب بار در حجم (مرحله ۴) و بر روی سطح (مرحله ۵) یک نیمه‌رسانا به جداسازی و انتقال بار (مرحله ۳) به نقاط فعال سطحی مرزی آسیب می‌زند که به‌عنوان عامل تعیین‌کننده کارایی کوانتومی فوتوکاتالیستی در نظر گرفته شده است. معمولاً، کوتاه کردن طول انتشار حامل‌های بار تولید شده یا ساخت میدان‌های الکتریکی مرزی می‌تواند نرخ‌های باز ترکیب را به‌طور مؤثری کاهش دهد و در نتیجه فعالیت

برای کاربردهای مختلف از طریق اصلاح مناسب سطح مانند، تشکیل فوتوکاتالیست‌های هیبریدی (۱۴) با ترکیبات قابل کنترل، ضخامت ساختار، ابعاد منافذ، توزیع اندازه و ریخت شناسی به عنوان موضوعات تحقیقاتی با اهمیت علمی و فناوری در زمینه‌های انرژی و شیمی محیطی در نظر گرفته می‌شود. البته، بسیاری از فوتوکاتالیست‌های جدید مبتنی بر نانوساختار $g-C_3N_4$ ، از جمله نانومیله‌های یک بعدی، نانوصفحات دو بعدی و ساختارهای سه بعدی، به دلیل جذب مطلوب تابش خورشیدی و جداسازی کارآمد حامل‌های بار، به‌طور گسترده در تحقیقات و پژوهش‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند (۱۵ و ۱۶) و چندین بررسی عالی نیز در حال حاضر موجود است که بر سنتز و اصلاح فوتوکاتالیست‌های مبتنی بر $g-C_3N_4$ و کاربردهای آن‌ها در حل مسائل انرژی و محیطی تمرکز دارند (۱۷ و ۱۸).

در این مطالعه، ما به بررسی اصول، ویژگی‌های چندمنظوره، طراحی و کاربردهای ویژه فوتوکاتالیست‌های $g-C_3N_4$ پرداخته‌ایم. این بررسی می‌تواند به رفع چالش‌های استفاده گسترده از فوتوکاتالیست‌های مبتنی بر $g-C_3N_4$ در تولید و ذخیره انرژی تجدیدپذیر و پایدار کمک کند.

مکانیزم فوتوکاتالیست‌های ناهمگن

مکانیزم بنیادی فوتوکاتالیست‌های ناهمگن شامل هفت مرحله کلیدی است (۱۹ و ۲۰) که مطابق با شکل (۱) معمولاً به چهار فرآیند اصلی تقسیم می‌شوند و شامل مراحل جذب نور (مرحله ۱)، برانگیختگی بار

¹Valence Band

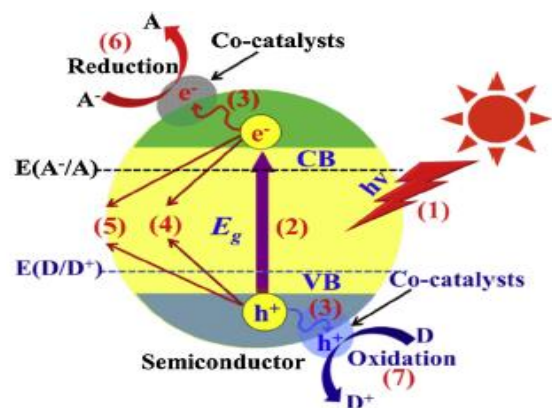
² Band gap energy

³ Conduction Band

شکاف باند و ساختار نانو $g-C_3N_4$ در کاربردهای فوتوکاتالیستی

تحلیل مکانیزم $g-C_3N_4$ نشان می‌دهد که شکاف باند و ساختار نانو این ماده برای کاربردهای فوتوکاتالیستی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. $g-C_3N_4$ دارای شکاف باند متوسطی به اندازه $2/7$ الکترون‌ولت است که به طول موج نوری 460 نانومتر مرتبط می‌شود. این ویژگی موجب می‌شود که $g-C_3N_4$ تحت نور مرئی فعال باشد. با در نظر گرفتن اتلاف‌های ترمودینامیکی و اضافه‌پتانسیل‌ها در فرآیند فوتوکاتالیستی، شکاف باند $2/7$ الکترون‌ولت به طور تصادفی بین 2 الکترون‌ولت و $3/1$ الکترون‌ولت قرار دارد که این امر امکان شکستن آب با نیروهای حرارتی کافی و جذب نور در محدوده مرئی را فراهم می‌کند (۲۵). موقعیت نوار هدایت $g-C_3N_4$ نیز برای واکنش‌های کاهش مختلف مناسب است. مطابق با داده‌های ارائه شده در شکل (۲)، سطح نوار هدایت $g-C_3N_4$ به طور قابل توجهی منفی‌تر از نیمه‌هادی غیرآلی هم‌تای آن است. این امر نشان می‌دهد که الکترون‌های تولید شده در $g-C_3N_4$ دارای نیروی محرکه ترمودینامیکی بالایی برای کاهش مولکول‌های کوچک نظیر H_2O ، CO_2 و O_2 است. لذا، ساختار الکترونیکی مناسب $g-C_3N_4$ آن را برای کاربردهای گسترده در زمینه‌هایی نظیر شکستن فوتوکاتالیستی آب، کاهش CO_2 ، تجزیه آلاینده‌ها، سنتز آلی و ضدعفونی بخوبی نشان می‌دهد (۲۶ و ۲۷). علاوه بر این، $g-C_3N_4$ دارای ساختار لایه‌ای دو بعدی است که در آن نانوصفحات گرافیتی با جایگزینی اتم نیتروژن به صورت تک‌لایه و از طریق هیبریداسیون sp^2 اتم‌های کربن و نیتروژن تشکیل شده و تنها توسط نیروهای واندروالس به هم متصل می‌شوند. این ماده تنها از دو

فوتوکاتالیستی را به طور قابل توجهی افزایش دهد (۲۳). در نهایت، واضح است که تنها الکترون‌ها و حفره‌هایی که انرژی کافی دارند به سطح نیمه‌رسانا مهاجرت می‌کنند و بدون بازترکیب باقی می‌مانند و می‌توانند توسط نقاط فعال سطحی یا کاتالیزورهای هم‌زمان جذب شوند و به ترتیب واکنش‌های الکتروکاتالیستی کاهش (مرحله ۶) و اکسیداسیون (مرحله ۷) مواد واکنش‌دهنده جذب شده بر روی نیمه‌رسانا را تحریک کنند. باید توجه داشت که واکنش‌های سطحی ممکن است زمانی رخ دهند که پتانسیل‌های کاهش و اکسیداسیون مثبت‌تر و منفی‌تر از سطوح CB و VB باشند. علاوه بر این، برای واکنش‌های الکتروکاتالیستی سطحی (استفاده از بار سطحی)، شروع پتانسیل بیش از حد بزرگ و سینتیک کند، دو عامل کلیدی هستند که کارایی فوتوکاتالیستی واکنش‌های کاهش و اکسیداسیون را محدود می‌کنند. این دو عامل محدودکننده می‌توانند با بارگذاری هم‌زمان کاتالیزورهای مناسب (الکتروکاتالیست‌ها) برطرف شوند (۲۴).



شکل (۱): مکانیزم بنیادی فوتوکاتالیست‌های ناهمگن که شامل مراحل زیر است: (۱) جذب نور، (۲) برانگیختگی بار، (۳) جداسازی و انتقال بار، (۴) بازترکیب بار در حجم، (۵) بازترکیب بار بر روی سطح، (۶) واکنش‌های کاهش سطحی و (۷) واکنش‌های اکسیداسیون سطحی (۲۳ و ۲۴)

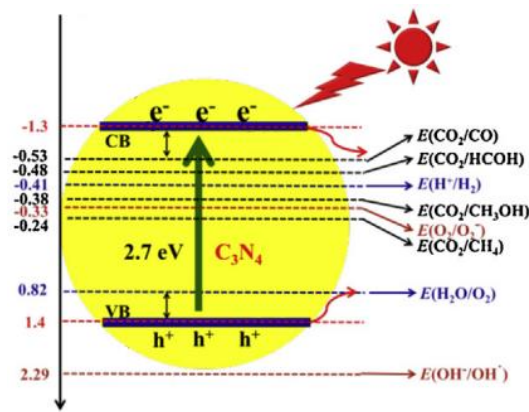
های نوری تولید شده تنها قادر به تولید اکسیژن از اکسیداسیون آب باشند و نتوانند رادیکال‌های هیدروکسیل غیرانتخابی (OH^\bullet) تولید کنند. این ویژگی‌ها نشان می‌دهد که کاتالیست‌های $\text{g-C}_3\text{N}_4$ می‌توانند گزینه‌ای مناسب برای اکسیداسیون انتخابی و تبدیل ترکیبات آلی در محیط‌های آبی باشند، در حالی که از معدنی شدن مستقیم به CO_2 جلوگیری می‌کنند. بنابراین، برای بهبود قدرت اکسیداسیون آب در $\text{g-C}_3\text{N}_4$ توصیه می‌شود که سطح نوار ظرفیت این ماده کاهش یابد (۳۰). اگرچه این چالش‌ها بر عملکرد فوتوکاتالیستی $\text{g-C}_3\text{N}_4$ تأثیر منفی می‌گذارند، اما هم‌زمان فرصت‌هایی را برای توسعه کاتالیست‌های نوری کارآمدتر مبتنی بر $\text{g-C}_3\text{N}_4$ در مطالعات آینده فراهم می‌آورند (۳۱).

خواص متنوع فوتوکاتالیست‌های مبتنی بر $\text{g-C}_3\text{N}_4$

- خواص ساختاری بلوری

C_3N_4 دارای هفت فاز مختلف است، از جمله α - C_3N_4 ، β - C_3N_4 ، مکعبی، C_3N_4 نیمه مکعبی، گرافیت-هترازین، گرافیت-هپتازین و گرافیت-ترازین، که به ترتیب دارای شکاف‌های انرژی ۵/۴۹، ۴/۸۵، ۴/۳۰، ۴/۱۳، ۲/۹۷، ۲/۸۸ و ۰/۹۳ الکترون‌ولت هستند. در میان آن‌ها، فاز بلوری معروف β - C_3N_4 به عنوان فازی با سختی بسیار بالا شناخته می‌شود که سختی آن مشابه الماس است. به جز فازهای نیمه مکعبی و گرافیت-هترازین، پنج فاز دیگر دارای شکاف‌های انرژی غیرمستقیم در ساختار توده‌ای خود هستند. فازهای گرافیت-هترازین و گرافیت-هپتازین دارای شکاف‌های انرژی مناسب ۲/۹۷ و ۲/۸۸ الکترون‌ولت برای جذب نور مرئی هستند که این

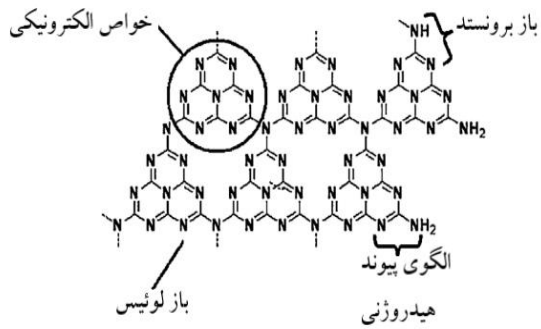
عنصر فراوان کربن و نیتروژن، با نسبت مولی C/N برابر ۰/۷۵ تشکیل شده است که نشان‌دهنده قابلیت تولید آسان و کم‌هزینه آن می‌باشد. از دیگر مزایای $\text{g-C}_3\text{N}_4$ می‌توان به زیست‌سازگاری و غیرسمی بودن آن اشاره کرد. $\text{g-C}_3\text{N}_4$ می‌تواند به راحتی از طریق روش‌های تراکم حرارتی سنتی چندین پیش‌ماده آلی غنی از نیتروژن مانند اوره، تیواوره، ملامین، دی‌سیانید آمید، سیانامید و هیدروکلراید گوانیدین در دماهای ۵۰۰ الی ۶۰۰ درجه سلسیوس تولید شود (۲۸).



شکل (۲): پتانسیل‌های اکسایش-کاهش واکنش‌های مربوطه نسبت به موقعیت تخمینی لبه‌های باند $\text{g-C}_3\text{N}_4$ (۲۷)

مزایا و چالش‌های فوتوکاتالیست‌های $\text{g-C}_3\text{N}_4$

$\text{g-C}_3\text{N}_4$ به‌عنوان یک کاتالیست بدون فلز، پایداری خوبی دارد و زیست‌سازگار است، که این ویژگی‌ها امکان استفاده از آن را در زمینه‌های مختلفی نظیر شکستن آب، کاهش CO_2 و تجزیه آلاینده‌ها فراهم می‌کند. با این حال، $\text{g-C}_3\text{N}_4$ با چالش‌هایی نیز مواجه است که عملکرد کاتالیستی آن را محدود می‌کند. یکی از مهم‌ترین این چالش‌ها، میزان بالای باز ترکیب الکترون-حفره است که به کاهش کارایی در واکنش‌های نوری منجر می‌شود (۲۹). همچنین، توان اکسیداسیون متوسط این ماده باعث می‌شود که حفره



شکل (۳): خواص سطحی چندمنظوره ماده پلیمری $g-C_3N_4$ با خواص الکترونیکی، باز برونستد و لویس و پیوند هیدروژنی.

- خواص پایداری

$g-C_3N_4$ دارای پایداری حرارتی بسیار بالایی است و به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر درجات مختلف پلیمریزاسیون در روش‌های مختلف تهیه قرار می‌گیرد. این پایداری حرارتی نه تنها ویژگی‌های عملکردی این ماده را در دماهای عملیاتی زیر ۵۰۰ درجه سلسیوس به‌عنوان یک کاتالیزور آلی ناهمگن نشان می‌دهد، بلکه امکان حذف آسان آن را در دماهای بالای ۶۰۰ درجه سلسیوس فراهم می‌کند. علاوه بر این، $g-C_3N_4$ پایداری شیمیایی فوق‌العاده‌ای را نشان می‌دهد و به‌عنوان یک ماده غیرمحلول در آب، اسید، باز و انواع مختلف حلال‌های آلی شناخته می‌شود. با این حال، باید توجه داشت که هیدروکسیدهای قلیایی ذوب‌شده و $KMnO_4$ می‌توانند منجر به هیدرولیز و تخریب اکسیداسیونی ساختارهای داخلی آن شوند (۳۷ و ۳۸).

- خواص الکترونیکی

خواص الکترونیکی $g-C_3N_4$ معمولاً با استفاده از روش‌هایی مانند نظریه چگالی^۱ (DFT) و طیف‌سنجی فوتوالکترونی^۲ (XPS) بررسی می‌شوند. این روش‌ها می‌توانند اطلاعات دقیق‌تری درباره موقعیت لبه‌های باند و ساختار الکترونیکی $g-C_3N_4$ ارائه دهند. ساختار

ویژگی به آن‌ها اجازه می‌دهد که در فرآیندهای فوتوکاتالیزوری به‌طور مؤثری عمل کنند (۳۳ و ۳۴).

- خواص فیزیکوشیمیایی سطح

وجود انواع نقص‌های سطحی در ترکیب $g-C_3N_4$ منجر به ویژگی‌های متنوع و خاصی می‌شود. به‌طور معمول، گروه‌های آمینی اولیه مانند C_2NH و CNH_2 در لبه‌های پایانی یک لایه از $g-C_3N_4$ ، که در شکل (۳) نشان داده شده‌اند، ممکن است به دلیل وجود ناخالصی‌های جزئی و یا پلیمریزاسیون ناقص ایجاد شوند. این نقص‌ها سبب می‌شوند که $g-C_3N_4$ رفتارهای نوکلئوفیلیک و خواص غنی از الکترون را از خود نشان دهد (۳۴ و ۳۵).

علاوه بر این، گروه‌های پایه‌ای (NH ، N ، NH_2 و NC) در سطح $g-C_3N_4$ برای حذف مولکول‌های سمی اسیدی از طریق جذب شیمیایی بر اساس تعاملات الکترواستاتیک عمل می‌کنند. از سوی دیگر خاصیت آب‌گریزی $g-C_3N_4$ می‌تواند منجر به ایجاد لایه‌های بین‌سطحی با تعاملات ضعیف شود که به‌طور قابل توجهی انتقال الکترون، جداسازی و واکنش‌های الکتروکاتالیزوری سطح را محدود می‌کند. در این نقطه، آب‌دوستی مواد $g-C_3N_4$ (با کاهش زاویه تماس آب بر روی سطح آن‌ها) می‌تواند از طریق گروه‌های عملکردی حاوی اکسیژن (هیدروکسیل و کربوکسیل) و از طریق اکسیداسیون شیمیایی بهبود یابد. این تغییرات به‌طور قابل توجهی به پراکندگی خوب آن‌ها در محلول‌های آبی کمک می‌کند (۳۶).

¹ Density Functional Theory

² X-ray Photoelectron Spectroscopy

مختلف تهیه شده، نشان‌دهنده تغییرات مهمی در لبه جذب این ماده است. با افزایش دما در فرآیندهای تراکم، لبه جذب به سمت طول موج‌های بلندتر جابجا می‌شود. این جابجایی به‌وضوح نشان‌دهنده کاهش شکاف باند ناشی از افزایش درجه پلیمریزاسیون است. رنگ زرد مایل به خاکستری $g-C_3N_4$ نیز نشان‌دهنده شکاف باند متوسطی است که برای جذب نور مرئی مطلوب است. جالب است که استراتژی‌های اصلاحی مانند آرایش با اتم‌های Fe، S، P، C، I، O و B، همچنین مدل اسید باربیتوریک می‌تواند منجر به جابجایی قرمز لبه‌های جذب شود. طیف فوتولومینسانس (PL) در دمای اتاق نشان‌دهنده یک باند قوی تابش آبی در دامنه ۴۰۰ تا ۶۵۰ نانومتر است که طول موج ماگزیم آن ۴۷۰ نانومتر می‌باشد. شدت سیگنال PL به‌عنوان معیاری برای ارزیابی نرخ بازترکیب الکترون‌ها و حفره‌های تولید شده در $g-C_3N_4$ استفاده می‌شود. شدت‌های پایین‌تر معمولاً به معنای بهبود جذب بار و انتقال مؤثر آن‌ها است که منجر به طولانی‌تر شدن عمر حامل‌های بار و بهبود فعالیت فوتوکاتالیستی می‌شود. با توجه به قابلیت‌های تغییر و بهبود این خواص از طریق روش‌های مختلف، $g-C_3N_4$ می‌تواند به‌عنوان یک کاتالیست مؤثر در واکنش‌های شیمیایی و تبدیل انرژی مورد استفاده قرار گیرد (۴۳-۴۱).

- خواص جذب

خواص جذب $g-C_3N_4$ به شدت تحت تأثیر میکروساختار متخلخل و ویژگی‌های شیمیایی سطح این ماده قرار دارد. مشابه با دیگر مواد دو بعدی مانند

الکترونیکی $g-C_3N_4$ تحت تأثیر پیوندهای کووالانسی و نوع اوربیتال‌های موجود در آن قرار دارد. محاسبات نظری نشان می‌دهد که شکاف باند بین بالاترین اوربیتال مولکولی اشغال شده^۱ (HOMO) و پایین‌ترین اوربیتال مولکولی اشغال نشده^۲ (LUMO) به‌طور میانگین برای نمونه‌های مختلف $g-C_3N_4$ به ترتیب ۲/۱ تا ۳/۵ الکترون ولت است که کاربرد این ماده را در زمینه‌های انرژی تجدیدپذیر و کاتالیزوری نشان می‌دهد. باندهای ظرفیت و رسانایی $g-C_3N_4$ عمدتاً ناشی از اوربیتال‌های p_z نیتروژن و کربن هستند. این اوربیتال‌ها در واکنش‌های شیمیایی، به‌ویژه در تولید هیدروژن و اکسیژن، نقش کلیدی دارند. همچنین، این اوربیتال‌ها باعث می‌شوند که $g-C_3N_4$ بتواند به‌عنوان یک کاتالیست مؤثر در واکنش‌های فوتوکاتالیستی عمل کند. تقویت با عناصر دیگر می‌تواند خواص الکترونیکی $g-C_3N_4$ را بهبود دهد. به‌عنوان مثال اضافه کردن عناصری مانند فسفر (P) یا کربن (C) می‌تواند لبه‌های باند رسانایی و ظرفیت را به‌طرز قابل توجهی تغییر دهد و واکنش‌های اکسیداسیون و کاهش را تسهیل کند. این تغییرات می‌توانند به توسعه فناوری‌های جدید در زمینه کاتالیست‌ها و ذخیره‌سازی انرژی کمک کنند (۳۹ و ۴۰).

- خواص نوری

خواص نوری $g-C_3N_4$ ، از جمله جذب نور UV/Vis، فوتولومینسانس^۳ و الکترومولومینسانس^۴، نقش کلیدی در کاربردهای فوتوشیمیایی این ماده ایفا می‌کند. طیف جذب UV/Vis، $g-C_3N_4$ که در دماهای

¹ Highest Occupied Molecular Orbital

² Lowest Unoccupied Molecular Orbital

³ Photoluminescence

⁴ Electroluminescence

بنابراین خواص جذب $g-C_3N_4$ به‌طور مستقیم به میکروساختار و ویژگی‌های شیمیایی سطح آن وابسته است. تعاملات الکتروستاتیکی و شیمیایی به‌عنوان مکانیسم‌های کلیدی در جذب مواد مختلف در $g-C_3N_4$ عمل می‌کنند و این ماده را به گزینه‌ای جذاب برای کاربردهای فوتوشیمیایی و محیط‌زیستی تبدیل می‌کنند. با توجه به این ویژگی‌ها، $g-C_3N_4$ پتانسیل بالایی برای استفاده در سیستم‌های جذب و کاتالیزوری دارد (۴۶).

- خواص الکتروشیمیایی

واکنش‌های کاهش و اکسیداسیون فوتوکاتالیستی روی سطح نیمه‌هادی‌ها اساساً واکنش‌های الکتروکاتالیستی هستند که به‌وسیله الکترون‌های تولید شده از نور و حفره‌های مثبت هدایت می‌شوند. $g-C_3N_4$ به‌عنوان یک الکتروکاتالیست چندمنظوره با فعالیت بالایی نسبت به کربن خالص شناخته می‌شود. اتم‌های نیتروژن پیریدینی در $g-C_3N_4$ دارای قابلیت پذیرش الکترون قوی هستند و می‌توانند به‌عنوان سایت‌های فعال برای واکنش‌های الکتروشیمیایی عمل کنند. با این حال، رسانایی متوسط و توانایی انتقال الکترون ضعیف $g-C_3N_4$ به‌طور قابل توجهی بر عملکرد الکتروشیمیایی آن تأثیر می‌گذارد. به همین دلیل، در سال‌های اخیر تحقیقات گسترده‌ای بر روی بهبود رسانایی الکتریکی و افزایش تعداد سایت‌های فعال در الکتروکاتالیست‌های مبتنی بر $g-C_3N_4$ متمرکز شده است. این تلاش‌ها شامل استراتژی‌هایی مانند آرایش با عناصر مختلف و اصلاح ساختاری برای ارتقاء عملکرد $g-C_3N_4$ در واکنش‌های الکتروشیمیایی است. با این بهبودها، $g-C_3N_4$ می‌تواند به‌عنوان یک

گرافن، انواع مختلفی از مواد جاذب می‌توانند بر روی گروه‌های عملکردی متفاوت (مانند گروه‌های آمینی) و نقاط نقص $g-C_3N_4$ از طریق تعاملات مختلف جذب شوند. این تعاملات شامل جذب فیزیکی، جاذبه الکتروستاتیکی و تعاملات شیمیایی هستند. یکی از مهم‌ترین مکانیسم‌های جذب در $g-C_3N_4$ ، تعاملات الکتروستاتیکی بین بار منفی $g-C_3N_4$ و مولکول‌های جاذب با بار مثبت است. این نوع تعاملات به‌ویژه در جذب رنگ‌های کاتیونی مانند متیلن بلو بسیار مؤثر است. مطالعات نشان داده‌اند که $g-C_3N_4$ با بار منفی ظرفیت جذب بسیار بالاتری نسبت به رنگ‌های کاتیونی در مقایسه با رنگ‌های آنیونی مانند متیل اورانژ دارد (۴۵ و ۴۴). این ویژگی به $g-C_3N_4$ اجازه می‌دهد تا به‌طور مؤثری جاذب رنگ‌ها و آلاینده‌های کاتیونی باشد. علاوه بر جاذبه الکتروستاتیکی، تعاملات شیمیایی نیز به‌طور گسترده‌ای برای تغییر خواص جذب $g-C_3N_4$ مورد استفاده قرار می‌گیرند. بر اساس اصل سخت و نرم اسیدها و بازها که توسط پیرسون معرفی شده است، اسیدهای سخت و نرم تمایل دارند با بازهای سخت و نرم به‌طور ترجیحی تعامل کنند. مطابق این اصل، مولکول‌های اسیدی مانند دی‌اکسید کربن (CO_2) و هیدروژن سولفید (H_2S) می‌توانند به راحتی با گروه‌های نیتروژن حاوی اسید در $g-C_3N_4$ پیوند شیمیایی برقرار کنند. این تعاملات شیمیایی می‌توانند به بهبود خواص جذب و همچنین افزایش کارایی $g-C_3N_4$ در کاربردهای مختلف کمک کنند. به‌عنوان مثال، اصلاح سطح $g-C_3N_4$ با گروه‌های عملکردی خاص می‌تواند ظرفیت جذب آن را برای مولکول‌های خاص افزایش دهد و به ایجاد جاذب‌های مؤثرتر در فرآیندهای فوتوکاتالیستی منجر شود.

استراتژی‌های طراحی فوتوکاتالیست‌های مبتنی بر $g-C_3N_4$

$g-C_3N_4$ به‌عنوان یک فوتوکاتالیست امیدوارکننده در زمینه‌های مختلفی از جمله تولید هیدروژن، کاهش CO_2 و تصفیه آب شناخته شده است. طراحی و بهینه‌سازی این فوتوکاتالیست‌ها نیازمند استراتژی‌های خاصی است که می‌تواند عملکرد آن‌ها را بهبود بخشد. در ادامه به بررسی برخی از این استراتژی‌ها پرداخته می‌شود.

- آلیش و اصلاح سطح

شکاف باند ایده‌آل برای نیمه‌هادی‌ها حدود 2 eV است تا بتوانند انواع نور مرئی را جذب کنند. اما $g-C_3N_4$ با شکاف باند 2.7 eV تنها نور با طول موج کمتر از 460 نانومتر را استفاده می‌کند. برای بهبود جذب نور، از استراتژی‌های مهندسی مانند افزودن اتمی (۵۰) و کوپلیمریزاسیون (۵۱) بهره گرفته می‌شود. دو نوع افزودن کاتیونی به نام‌های "افزودن حفره ای" و "افزودن بین لایه‌ای" وجود دارد (شکل (۴))، در افزودن بین لایه‌ای، یون‌های فلزی مانند M^{n+} در حفره‌های بزرگ $g-C_3N_4$ ادغام می‌شوند که می‌تواند حامل‌ها را تحریک کرده و جذب نور را بیشتر کند. در افزودن بین لایه‌ای دو لایه مجاور $g-C_3N_4$ با یون‌های قلیایی مانند K^+ موجب کاهش شکاف باند، گسترش سیستم‌های مزدوج و جابه‌جایی مثبت موقعیت نوار ظرفیت می‌شود. این تغییرات به افزایش جذب نور مرئی، جداسازی کارآمد بار و توانایی اکسیداسیون قوی منجر می‌شود. علاوه بر آلیش فلزی، آلیش غیرفلزی نیز به‌طور عمده از طریق

گزینه مناسب در کاربردهای کاتالیستی و انرژی تجدیدپذیر مورد استفاده قرار گیرد (۴۷ و ۴۸).

- خواص فوتو الکتروشیمیایی

$g-C_3N_4$ به‌عنوان یک ماده امیدوارکننده برای تبدیل انرژی خورشیدی در سلول‌های فوتوکاتالیستی الکتروشیمیایی شناخته می‌شود. این ماده به دلیل پایداری شیمیایی و حرارتی بالا و همچنین ساختار مناسب باند الکترونیکی، توجه زیادی را به خود جلب کرده است. تحقیقات اولیه نشان داده‌اند که فیلم $g-C_3N_4$ در محلول‌های آبی KCl که حاوی یون‌های $Fe(II)$ هستند، می‌تواند پاسخ فوتوکاتدی حداکثری تا حدود 50 mA cm^{-2} را تحت نور مرئی نشان دهد. این ویژگی به $g-C_3N_4$ اجازه می‌دهد تا به‌عنوان یک کاتالیست مؤثر در فرآیندهای تبدیل انرژی خورشیدی عمل کند. علاوه بر این، ظرفیت بالای جذب نور و توانایی در تولید الکترون و حفره‌های مثبت در پاسخ به تابش نور، موجب بهبود کارایی آن در واکنش‌های فوتوکاتالیستی می‌شود. با توسعه و بهینه‌سازی روش‌های سنتز و اصلاح ساختاری، $g-C_3N_4$ می‌تواند به‌طور قابل توجهی عملکرد خود را در کاربردهای انرژی‌های تجدیدپذیر افزایش دهد. بنابراین، $g-C_3N_4$ به‌عنوان یک گزینه مناسب در زمینه‌های مختلفی مانند تجزیه آب به هیدروژن، تصفیه آب و تولید سوخت‌های خورشیدی به شمار می‌آید و می‌تواند به توسعه فناوری‌های پایدار کمک کند (۴۹).

¹ Cave Doping

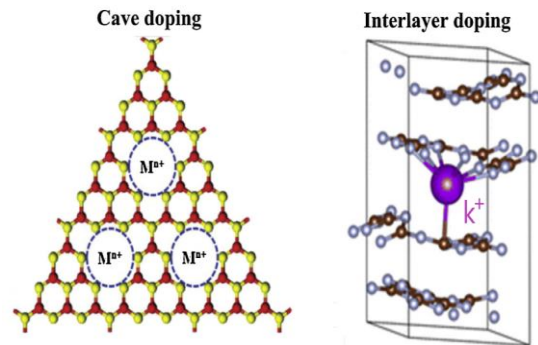
² Interlayer Doping

در سال‌های اخیر، نیمه‌هادی‌های ZnO به دلیل هزینه پایین، سازگاری با محیط زیست و روش‌های سنتزی ساده، بیشتر از TiO_2 مورد توجه قرار گرفته‌اند. به ویژه، عملکرد فوتوکاتالیستی ZnO در برخی گزارش‌ها بهتر از TiO_2 ارزیابی شده است (۶۴).

- مهندسی ساختار

یک استراتژی کلیدی در طراحی مواد فوتوکاتالیستی، تنظیم ساختارها و بافت متخلخل $g-C_3N_4$ است. این تنظیمات می‌توانند به طور قابل ملاحظه‌ای سطح در معرض و میزان تخلخل این مواد را افزایش دهند، که این امر به تسهیل انتقال جرم، جداسازی بار، واکنش‌های سطحی و جذب نور کمک می‌کند. این ویژگی‌ها به ویژه می‌توانند کارایی فوتوکاتالیستی $g-C_3N_4$ را بهبود بخشند. انواع مختلف $g-C_3N_4$ مزو متخلخل با نانومعماری‌های متنوع از طریق چندین روش مرسوم از جمله قالب‌بندی سخت، قالب‌سازی نرم، و روش‌های بدون الگو تولید شده‌اند (۵۳-۵۵). قالب‌بندی سخت (نانوریخته‌گری) به عنوان یکی از مؤثرترین و ساده‌ترین روش‌ها برای تولید فوتوکاتالیست‌های $g-C_3N_4$ با اندازه سطح بالا شناخته شده است. به طور نظری، می‌توان از انواع مواد ماکروپور و مزوپور با مساحت سطح بالا به عنوان الگوهای سخت برای تولید $g-C_3N_4$ متخلخل استفاده کرد. تاکنون، قالب‌های سخت مختلفی از جمله آندی متخلخل Al_2O_3 ، $CaCO_3$ ، نانوصفحات گرافن اکسید و سیلیس مزو متخلخل در فرآیند توسعه $g-C_3N_4$ به کار رفته‌اند. از میان این‌ها، مواد سیلیکات به عنوان پرکاربردترین قالب‌های سخت شناخته شده‌اند. با این حال، مشکلاتی نیز وجود دارد؛ به عنوان مثال، هوای محبوس شده و دیواره‌های ضعیف اسیدی مزوپورها

افزودن شیمیایی انجام می‌شود. عناصر مختلف مانند S ، P و B می‌توانند شکاف باند $g-C_3N_4$ را کاهش دهند و قابلیت جذب نور را افزایش دهند. با این حال، افزودن بیش از حد می‌تواند به ایجاد نقص‌هایی منجر شود که عملکرد فوتوکاتالیستی را کاهش می‌دهد. بنابراین، تحقیقات به آلیس مشترک فلزات و غیرفلزات توجه بیشتری دارد تا اثرات هم‌افزایشان بر جذب نور و خواص فوتوکاتالیستی را بررسی کند (۵۲). کوپلیمریزاسیون نیز به بهبود مکان‌یابی الکترون‌ها و فعالیت‌های فوتوشیمیایی کمک می‌کند.



شکل (۴): دو نوع آلیس یون‌های فلزی در چارچوب $g-C_3N_4$ (۶۱ و ۶۲)

- ساخت نانوکامپوزیت‌ها

مواد نیمه‌هادی با سطح انرژی بالا مانند ZnO ، TiO_2 و $SrTiO_3$ به عنوان فوتوکاتالیست‌های مؤثر شناخته می‌شوند، زیرا پتانسیل اکسایش-کاهش بالایی برای حامل‌های بار به وجود آمده توسط نور دارند (۶۳). ترکیب $g-C_3N_4$ با مواد نیمه‌هادی مانند ZnO و TiO_2 می‌تواند به بهبود انتقال بار و کاهش نرخ بازترکیب الکترون‌ها و حفره‌ها منجر شود. این نانوکامپوزیت‌ها معمولاً دارای فعالیت فوتوکاتالیستی بالاتری هستند و می‌توانند در واکنش‌های شیمیایی مختلف به کار روند.

- استفاده از مواد حفره‌دار

استفاده از مواد حفره‌دار مانند MOF (چارچوب‌های آلی فلزی^۲) به عنوان حامل برای $g-C_3N_4$ می‌تواند به بهبود جذب نور و انتقال بار کمک کند. این ترکیبات می‌توانند به عنوان یک پشتیبان برای $g-C_3N_4$ عمل کرده و به افزایش کارایی فوتوکاتالیستی آن کمک کنند (۵۷). پشتیبان‌ها می‌توانند با افزایش سطح تماس میان فوتوکاتالیست و مواد واکنش‌دهنده خواص شیمیایی $g-C_3N_4$ را تنظیم و توانایی جذب و واکنش با آلاینده‌ها را بهبود بخشند. همچنین، این پشتیبان‌ها می‌توانند به حفظ یکپارچگی ساختاری $g-C_3N_4$ کمک کنند. پایداری بیشتر به‌ویژه در شرایط محیطی مختلف، نظیر دما و رطوبت، اهمیت دارد و موجب می‌شود که $g-C_3N_4$ در طول زمان به‌طور مؤثری کارایی خود را حفظ کند. علاوه بر این، MOF‌ها می‌توانند به عنوان واسطه‌ای برای جذب نور عمل کنند و انرژی نور UV یا مرئی را به $g-C_3N_4$ منتقل کنند. این انتقال انرژی به افزایش تحریک الکترون‌ها و در نتیجه بهبود عملکرد فوتوکاتالیستی منجر می‌شود. همچنین، پشتیبان‌ها می‌توانند با ایجاد مسیرهای بهینه برای الکترون‌ها و حفره‌ها، باز ترکیب جفت‌های الکترون-حفره را کاهش دهند که از عوامل مهم در افزایش کارایی فوتوکاتالیستی است (۶۵).

برخی از کاربردهای مهم $g-C_3N_4$

- فوتوکاتالیست‌ها

یکی از مهم‌ترین کاربردهای $g-C_3N_4$ ، به عنوان فوتوکاتالیست در فرایندهای شکافت آب و تولید هیدروژن است. این ماده قادر است با جذب نور

می‌تواند مانع نفوذ و انتشار سریع پیش‌ماده‌های^۱ آلی شوند و در نتیجه منجر به استفاده ناکافی از ساختارهای متخلخل و کاهش سطح موثر $g-C_3N_4$ گردند. همچنین، استفاده از الگوهای نرم به عنوان یک استراتژی "سبز" می‌تواند به جلوگیری از مشکلات مربوط به روش‌های قالب‌بندی سخت کمک کند. این الگوها می‌توانند به‌طور مؤثری به رشد ترکیب مورد نظر از پیش‌ماده‌ها در اطراف خود کمک کرده و ساختارهای ترکیبی مورد نظر را ایجاد نمایند. قالب‌های نرم متنوع مانند مایعات یونی و پلیمرها نیز در تولید فوتوکاتالیست‌های متخلخل $g-C_3N_4$ به کار رفته‌اند. با این حال، معایب این مواد شامل هزینه‌های بالا و مشکلات زیست‌محیطی، کاربردهای عملی آن‌ها را در مقیاس بزرگ محدود کرده است. در نهایت، روش‌های خود مونتاژ سوپرمولکولی و بدون الگو نیز به عنوان استراتژی‌های امیدوارکننده‌ای برای تولید $g-C_3N_4$ متخلخل معرفی شده‌اند (۵۶). با این حال، در مقایسه با روش‌های قالب‌بندی سخت، مساحت سطح $g-C_3N_4$ تولید شده توسط این دو استراتژی هنوز به اندازه لازم کافی نیست. بنابراین، نیاز به تحقیقات بیشتری برای بهبود این روش‌ها و افزایش کارایی فوتوکاتالیستی $g-C_3N_4$ احساس می‌شود. بنابراین، تغییر در ساختار $g-C_3N_4$ ، مانند ایجاد نانوذرات، می‌تواند سطح فعال بیشتری را فراهم کند و بهبود قابل توجهی در فعالیت فوتوکاتالیستی ایجاد کند. این تغییرات می‌توانند به افزایش سطح تماس با واکنش‌دهنده‌ها و بهبود جذب نور منجر شوند.

² Metal-Organic Frameworks¹ precursors

حسگرهای بیولوژیکی برای تشخیص بیماری‌ها و عفونت‌ها مورد استفاده قرار گیرد. این حسگرها می‌توانند به سرعت و با دقت بالا مواد هدف را شناسایی کنند (۶۰).

- توسعه فناوری‌های پایدار

$g-C_3N_4$ به‌عنوان یک ماده مؤثر در جمع‌آوری انرژی خورشیدی و تبدیل آن به انرژی الکتریکی شناخته شده است. این ماده می‌تواند در ساخت سلول‌های خورشیدی با کارایی بالا به کار رود. $g-C_3N_4$ به‌خودی‌خود می‌تواند به‌عنوان یک ماده جذب‌کننده نور عمل کند و با ترکیب با مواد دیگر، کارایی تبدیل انرژی خورشیدی به الکتریسیته را افزایش دهد. با توجه به نیاز روزافزون به منابع انرژی پاک، $g-C_3N_4$ می‌تواند به‌عنوان یک جزء کلیدی در توسعه فناوری‌های پایدار برای جمع‌آوری و ذخیره‌سازی انرژی خورشیدی به کار رود (۵۱).

- بازیافت و ذخیره‌سازی انرژی

این ماده به‌عنوان یک کاتالیست در واکنش‌های شیمیایی برای بازیافت انرژی و ذخیره‌سازی هیدروژن مورد استفاده قرار می‌گیرد. توانایی $g-C_3N_4$ در تسریع واکنش‌های شیمیایی می‌تواند به بهبود فرآیندهای ذخیره‌سازی انرژی کمک کند. به‌خصوص در تولید هیدروژن از منابع تجدیدپذیر، $g-C_3N_4$ می‌تواند نقش مهمی ایفا کند. استفاده از $g-C_3N_4$ به‌عنوان یک کاتالیست در تولید و ذخیره‌سازی هیدروژن می‌تواند به کاهش هزینه‌ها و افزایش کارایی این فرآیندها کمک کند (۵۱).

نتیجه‌گیری

در این بررسی، مزایا و ویژگی‌های چندمنظوره فوتوکاتالیست‌های کامپوزیتی مبتنی بر $g-C_3N_4$ مورد

خورشید، انرژی آن را برای شکافت آب به هیدروژن و اکسیژن تبدیل کند. برای بهینه‌سازی فعالیت فوتوکاتالیستی $g-C_3N_4$ با کاتالیست‌های دیگر مانند نانوذرات فلزی (به خصوص نقره و پلاتین) ترکیب می‌شود که می‌تواند فعالیت فوتوکاتالیستی آن را به‌طور قابل توجهی افزایش دهد. نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که بارگذاری نانوذرات Pt بر روی $g-C_3N_4$ ، به بهبود تفکیک بارهای الکتریکی و در نتیجه افزایش نرخ تولید H_2 منجر می‌شود (۵۹).

- حذف آلاینده‌ها

$g-C_3N_4$ به‌عنوان یک کاتالیست در فرایندهای حذف آلاینده‌ها از آب و هوا به کار می‌رود. این ماده می‌تواند در واکنش‌های اکسیداسیون برای تجزیه آلاینده‌های آلی (۵۷) و فلزات سنگین (۵۸) به کار رود. به‌ویژه در شرایط نوری، $g-C_3N_4$ می‌تواند به کاهش آلاینده‌ها کمک کند و به حفظ محیط زیست یاری رساند. با توجه به افزایش نگرانی‌ها درباره آلاینده‌ها، توسعه سیستم‌های پایدار برای حذف آلاینده‌ها با استفاده از $g-C_3N_4$ می‌تواند راه‌حلی مؤثر باشد. استفاده از این ماده در ترکیب با دیگر مواد کاتالیستی می‌تواند به بهبود کارایی سیستم‌های تصفیه آب و هوای آلوده کمک کند.

- حسگرها

$g-C_3N_4$ به‌عنوان یک ماده حسگر در تشخیص مواد شیمیایی و بیولوژیکی به کار می‌رود (۵۹). ویژگی‌های الکتریکی و نوری این ماده می‌تواند به طراحی حسگرهای با حساسیت بالا و انتخابی کمک کند. حسگرهای مبتنی بر $g-C_3N_4$ می‌توانند در صنایع داروسازی، بهداشت، محیط زیست و کشاورزی کاربرد داشته باشند. همچنین $g-C_3N_4$ به دلیل قابلیت اتصال به مولکول‌های بیولوژیکی، می‌تواند به‌عنوان

- [4] Wang, C.-C., Li, J.-R., Lv, X.-L., Zhang, Y.-Q., Guo, G., 2014, Photocatalytic organic pollutants degradation in metal-organic frameworks, *Energy & Environmental Science*, 7, 2831.
- [5] Li, X., Wen, J., Low, J., Fang, Y., Yu, J., 2014, Design and fabrication of semiconductor photocatalyst for photocatalytic reduction of CO₂ to solar fuel, *Science China Materials*, 57, 70.
- [6] Lang, X., Chen, X., Zhao, J., 2014, Heterogeneous visible light photocatalysis for selective organic transformations, *Chemical Society Reviews*, 43, 473.
- [7] Masih, D., Ma, Y., Rohani, S., 2017, Graphitic C₃N₄ based noble-metal-free photocatalyst systems: A review, *Applied Catalysis B: Environmental*, 206, 556.
- [8] Patnaik, S., Sahoo, D.P., Parida, K., 2018, An overview on Ag modified g-C₃N₄ based nanostructured materials for energy and environmental applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 1297.
- [9] Ran, J., Gao, G., Li, F.-T., Ma, T.-Y., Du, A., Qiao, S.-Z., 2017, Ti₃C₂ MXene co-catalyst on metal sulfide photo-absorbers for enhanced visible-light photocatalytic hydrogen production, *Nature Communications*, 8, 13907.
- [10] Kumar, S., Karthikeyan, S., Lee, A.F., 2018, g-C₃N₄-based nanomaterials for visible light-driven photocatalysis, *Catalysts*, 8, 74.
- [11] Chen, F., Yang, H., Wang, X., Yu, H., 2017, Facile synthesis and enhanced photocatalytic H₂-evolution performance of NiS₂-modified g-C₃N₄ photocatalysts, *Chinese Journal of Catalysis*, 38, 296.
- [12] Cao, S., Huang, Q., Zhu, B., Yu, J., 2017, Trace-level phosphorus and sodium co-doping of g-C₃N₄ for enhanced photocatalytic H₂ production, *Journal of Power Sources*, 351, 151.
- [13] Gomari, K.A., Hafeez, H.Y., Mohammed, J., Dankawu, U.M., Ndikilar, C.E., Suleiman, A.B., 2024, A recent development and future prospect of g-C₃N₄-based photocatalyst for stable hydrogen (H₂) generation via photocatalytic water-splitting, *International Journal of Hydrogen Energy*, 85, 598.
- [14] Hao, P., Chen, Z., Yan, Y., Shi, W., Guo, F., 2024, Recent advances, application and prospect in g-C₃N₄-based S-scheme

بحث قرار گرفت. g-C₃N₄ به‌عنوان یکی از گزینه‌های امیدوارکننده برای طراحی فوتوکاتالیست‌های پیشرفته در تولید هیدروژن، حذف آلاینده‌ها، حسگرها و سلول‌های خورشیدی شناخته شده و به‌عنوان یک گزینه جذاب در توسعه فناوری‌های پایدار و محیط زیست به‌شمار می‌آید. با وجود پیشرفت‌های قابل‌توجهی که در سال‌های اخیر حاصل شده است، هنوز چالش‌های زیادی برای ساخت فوتوکاتالیست‌های کارآمد مبتنی بر g-C₃N₄ وجود دارد. به‌طور کلی، باید به بررسی دقیق‌تر خواص فوتوکاتالیستی g-C₃N₄ پرداخته شود، زیرا تولید فوتوکاتالیست‌های بسیار مؤثر با شکاف باند باریک هنوز چالش‌برانگیز است. همچنین، کنترل دقیق عیوب سطحی و روش‌های آسان برای تولید نانوصفحات g-C₃N₄ از اهمیت بالایی برخوردار است. در میان استراتژی‌های طراحی مختلف، توجه به ابعاد، ساختار منافذ و طراحی پیوندهای ناهمگن می‌تواند به بهبود کارایی فوتوکاتالیست‌های مبتنی بر g-C₃N₄ کمک کند. در نهایت، g-C₃N₄ با ویژگی‌های منحصر به فرد خود، پتانسیل بالایی در فناوری‌های نوین و توسعه راهکارهای پایدار برای حل چالش‌های جهانی مانند بحران انرژی و آلودگی محیط زیست دارد.

منابع

- [1] Fujishima, A., Honda, K., 1972, Electrochemical photolysis of water at a semiconductor electrode, *Nature*, 238, 37.
- [2] Bard, A.J., 1979, Photoelectrochemistry and heterogeneous photo-catalysis at semiconductors, *Journal of Photochemistry*, 10, 59.
- [3] Kato, H., Hori, M., Kouta, R., Shimodaira, Y., Kudo, A., 2004, Construction of Z-scheme type heterogeneous photocatalysis systems for water splitting into H₂ and O₂ under visible light irradiation, *Chemistry Letters*, 33, 1348.

- [23] Song, B., Zeng, Z., Zeng, G., Gong, J., Xiao, R., Ye, S., Chen, M., Lai, C., Xu, P., Tang, X., 2019, Powerful combination of $g-C_3N_4$ and LDHs for enhanced photocatalytic performance: A review of strategy, synthesis, and applications, *Advances in Colloid and Interface Science*, 272, 101999.
- [24] Wudil, Y.S., Ahmad, U.F., Gondal, M.A., Al-Osta, M.A., Almohammed, A., Sa'id, R.S., Hrahsheh, F., Haruna, K., Mohamed, M.J.S., 2023, Tuning of graphitic carbon nitride ($g-C_3N_4$) for photocatalysis: A critical review, *Arabian Journal of Chemistry*, 16, 104542.
- [25] Wang, J., Wang, S., 2022, A critical review on graphitic carbon nitride ($g-C_3N_4$)-based materials: Preparation, modification and environmental application, *Coordination Chemistry Reviews*, 453, 214338.
- [26] Li, Y., Gu, M., Zhang, X., Fan, J., Lv, K., Carabineiro, S.A.C., Dong, F., 2020, 2D $g-C_3N_4$ for advancement of photo-generated carrier dynamics: Status and challenges, *Materials Today*, 41, 270.
- [27] Huang, H., Jiang, L., Yang, J., Zhou, S., Yuan, X., Liang, J., Wang, H., Wang, H., Bu, Y., Li, H., 2023, Synthesis and modification of ultrathin $g-C_3N_4$ for photocatalytic energy and environmental applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 173, 113110.
- [28] Khan, M.A., Mutahir, S., Shaheen, I., Qunhui, Y., Bououdina, M., Humayun, M., 2025, Recent advances over the doped $g-C_3N_4$ in photocatalysis: A review, *Coordination Chemistry Reviews*, 522, 216227.
- [29] Gorai, D.K., Kuila, S.K., Kumar, A., Ahmad, M.I., Kundu, T.K., 2023, Insight into the effect of Li/P co-doping on the electronic structure and photocatalytic performance of $g-C_3N_4$ by the first principle, *Applied Surface Science*, 623, 157031.
- [30] Liu, X., Kang, W., Zeng, W., Zhang, Y., Qi, L., Ling, F., Fang, L., Chen, Q., Zhou, M., 2020, Structural, electronic and photocatalytic properties of $g-C_3N_4$ with intrinsic defects: A first-principles hybrid functional investigation, *Applied Surface Science*, 499, 143994.
- [31] Liu, J., Cheng, B., 2018, New understanding of photocatalytic properties of zigzag and armchair $g-C_3N_4$ nanotubes from electronic structures and carrier effective mass, *Applied Surface Science*, 430, 348.
- heterojunction photocatalysts, *Separation and Purification Technology*, 330, 125302.
- [15] Li, Y., Zhou, M., Cheng, B., Shao, Y., 2020, Recent advances in $g-C_3N_4$ -based heterojunction photocatalysts, *Journal of Materials Science & Technology*, 56, 1.
- [16] Yang, X., Ye, Y., Sun, J., Li, Z., Ping, J., Sun, X., 2022, Recent advances in $g-C_3N_4$ -based photocatalysts for pollutant degradation and bacterial disinfection: Design strategies, mechanisms, and applications, *Small*, 18, 2105089.
- [17] Xing, J., Wang, N., Li, X., Wang, J., Taiwaikuli, M., Huang, X., Wang, T., Zhou, L., Hao, H., 2022, Synthesis and modifications of $g-C_3N_4$ -based materials and their applications in wastewater pollutants removal, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10, 108782.
- [18] Sohail, M., Anwar, U., Taha, T.A., Qazi, H.I.A., Al-Sehemi, A.G., Ullah, S., Algarni, H., Ahmed, I.M., Amin, M.A., Palamanit, A. Iqbal, W., Alharthi, S., Nawawi, W.I., Ajmal, Z., Ali, H., Hayat, A., 2022, Nanostructured materials based on $g-C_3N_4$ for enhanced photocatalytic activity and potentials application: A review, *Arabian Journal of Chemistry*, 15, 104070.
- [19] Yan, Y., Meng, Q., Tian, L., Cai, Y., Zhang, Y. Chen, Y., 2024, Engineering of $g-C_3N_4$ for photocatalytic hydrogen production: A review, *International Journal of Molecular Sciences*, 25, 8842.
- [20] Ismael, M., 2020, A review on graphitic carbon nitride ($g-C_3N_4$) based nanocomposites: Synthesis, categories, and their application in photocatalysis, *Journal of Alloys and Compounds*, 846, 156446.
- [21] He, F., Wang, Z., Li, Y., Peng, S., Liu, B., 2020, The nonmetal modulation of composition and morphology of $g-C_3N_4$ -based photocatalysts, *Applied Catalysis B: Environmental*, 269, 118828.
- [22] Hayat, A., Sohail, M., El Jery, A., Al-Zaydi, K.M., Alshammari, K.F., Khan, J., Ali, H., Ajmal, Z., Taha, T.A., Ud Din, I., Altamimi, R., Hussein, M.A., Al-Hadeethi, Y., Orooji, Y., Ansari, M.Z., 2023, Different dimensionalities, morphological advancements and engineering of $g-C_3N_4$ -based nanomaterials for energy conversion and storage, *The Chemical Record*, 23, e202200171.

- [41] Tahir, M., Cao, C., Mahmood, N., Butt, F.K., Mahmood, A., Idrees, F., Hussain, S., Tanveer, M., Ali, Z., Aslam, I., 2014, Multifunctional g-C₃N₄ nanofibers: A template-free fabrication and enhanced optical, electrochemical, and photocatalyst properties, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 6, 1258.
- [42] Zhou, X., Zhao, C., Chen, J., Chen, L., 2021, Influence of B, Zn, and B-Zn doping on electronic structure and optical properties of g-C₃N₄ photocatalyst: A first-principles study, *Results in Physics*, 26, 104338.
- [43] Zhang, H., Tang, Y., Liu, Z., Zhu, Z., Tang, X., Wang, Y., 2020, Study on optical properties of alkali metal doped g-C₃N₄ and their photocatalytic activity for reduction of CO₂, *Chemical Physics Letters*, 751, 137467.
- [44] Li, J., Liu, Y., Li, H., Chen, C., 2016, Fabrication of g-C₃N₄/TiO₂ composite photocatalyst with extended absorption wavelength range and enhanced photocatalytic performance, *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 317, 151.
- [45] Zhao, S., Chen, S., Yu, H., Quan, X., 2012, g-C₃N₄/TiO₂ hybrid photocatalyst with wide absorption wavelength range and effective photogenerated charge separation, *Separation and Purification Technology*, 99, 50.
- [46] Pan, Y., Zhang, Y., Li, Z., Yang, N., Deng, W., Fang, Z., Li, C., Long, Z., 2020, A selective cataluminescence sensor with a homemade gaseous sample introduction system for accurate and sensitive determination of H₂S using catalytic g-C₃N₄@Fe, *Microchemical Journal*, 156, 104833.
- [47] Ansari, S.A., Cho, M.H., 2017, Simple and large scale construction of MoS₂-g-C₃N₄ heterostructures using mechanochemistry for high performance electrochemical supercapacitor and visible light photocatalytic applications, *Scientific Reports*, 7, 43055.
- [48] Bu, Y., Chen, Z., Li, W., 2014, Using electrochemical methods to study the promotion mechanism of the photoelectric conversion performance of Ag-modified mesoporous g-C₃N₄ heterojunction material, *Applied Catalysis B: Environmental*, 144, 622.
- [49] Nguyen-Dinh, M.-T., Bui, T.S., Bansal, P., Jourshabani, M., Lee, B.K., 2021, Photocatalytic and photo-electrochemical behavior of novel SnO₂-modified-g-C₃N₄ for complete elimination of tetracycline under
- [32] Xu, Q., Ma, D., Yang, S., Tian, Z., Cheng, B., Fan, J., 2019, Novel g-C₃N₄/g-C₃N₄ S-scheme isotype heterojunction for improved photocatalytic hydrogen generation, *Applied Surface Science*, 495, 143555.
- [33] Li, Y., Yang, M., Xing, Y., Liu, X., Yang, Y., Wang, X., Song, S., 2017, Preparation of carbon-rich g-C₃N₄ nanosheets with enhanced visible light utilization for efficient photocatalytic hydrogen production, *Small*, 13, 1701552.
- [34] Bandyopadhyay, A., Ghosh, D., Kaley, N.M., Pati, S.K., 2017, Photocatalytic activity of g-C₃N₄ quantum dots in visible light: Effect of physicochemical modifications, *The Journal of Physical Chemistry C*, 121, 1982.
- [35] Dong, S., Cai, W., Sheng, L., Wang, W., Liu, H., Xia, J., 2020, Combined effect of physicochemical factors on the retention and transport of g-C₃N₄ in porous media, *Chemosphere*, 256, 127100.
- [36] Dong, G., Zhang, Y., Pan, Q., Qiu, J., 2014, A fantastic graphitic carbon nitride (g-C₃N₄) material: Electronic structure, photocatalytic and photoelectronic properties, *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, 20, 33.
- [37] Pomilla, F.R., Cortes, M.A.L.R.M., Hamilton, J.W.J., Molinari, R., Barbieri, G., Marci, G., Palmisano, L., Sharma, P.K., Brown, A., Byrne, J.A., 2018, An investigation into the stability of graphitic C₃N₄ as a photocatalyst for CO₂ reduction, *The Journal of Physical Chemistry C*, 122, 28727.
- [38] Pawar, R.C., Kang, S., Park, J.H., Kim, J.-H., Ahn, S., Lee, C.S., 2016, Room-temperature synthesis of nanoporous 1D microrods of graphitic carbon nitride (g-C₃N₄) with highly enhanced photocatalytic activity and stability, *Scientific Reports*, 6, 31147.
- [39] Cherkasov, N., Ibadon, A.O., Fitzpatrick, P., 2015, A review of the existing and alternative methods for greener nitrogen fixation, *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 90, 24.
- [40] Ling, G.Z.S., Ng, S.-F., Ong, W.-J., 2022, Tailor-engineered 2D cocatalysts: harnessing electron-hole redox center of 2D g-C₃N₄ photocatalysts toward solar-to-chemical conversion and environmental purification, *Advanced Functional Materials*, 32, 2111875.

- based photocatalysts: A review, *Environmental Research*, 216, 114660.
- [59] Yuan, Q., Li, L., Tang, Y., Zhang, X., 2020, A facile Pt-doped $g-C_3N_4$ photocatalytic biosensor for visual detection of superoxide dismutase in serum samples, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 318, 128238.
- [60] Çapar, N., Yola, B.B., Polat, İ., Bekerecioğlu, S., Atar, N., Yola, M.L., 2023, A zearalenone detection based on molecularly imprinted surface plasmon resonance sensor including sulfur-doped $g-C_3N_4/Bi_2S_3$ nanocomposite, *Microchemical Journal*, 193, 109141.
- [61] Xiong, T., Cen, W., Zhang, Y., Dong, F., 2016, Bridging the $g-C_3N_4$ interlayers for enhanced photocatalysis, *ACS Catalysis*, 6, 2462.
- [62] Niu, X., Yi, Y., Bai, X., Zhang, J., Zhou, Z., Chu, L., Yang, J., Li, X., 2019, Photocatalytic performance of few-layer graphitic C_3N_4 : Enhanced by interlayer coupling, *Nanoscale*, 11, 4101.
- [63] Mohini, R., Lakshminarasimhan, N., 2016, Coupled semiconductor nanocomposite $g-C_3N_4/TiO_2$ with enhanced visible light photocatalytic activity, *Materials Research Bulletin*, 76, 370.
- [64] Pestana, C.J., Hui, J., Camacho-Muñoz, D., Edwards, C., Robertson, P.K.J., Irvine, J.T.S., Lawton, L.A., 2023, Solar-driven semiconductor photocatalytic water treatment (TiO_2 , $g-C_3N_4$, and $TiO_2+g-C_3N_4$) of cyanotoxins: Proof-of-concept study with microcystin-LR, *Chemosphere*, 310, 136828.
- [65] Duan, C., Meng, X., Liu, C., Lu, W., Liu, J., Dai, L., Wang, W., Zhao, W., Xiong, C., Ni, Y., 2019, Carbohydrates-rich corncoobs supported metal-organic frameworks as versatile biosorbents for dye removal and microbial inactivation, *Carbohydrate Polymers*, 222, 115042.
- visible-light irradiation: Slurry and fixed-bed approach, *Separation and Purification Technology*, 267, 118607.
- [50] Yu, X., He, X., Zhang, X., Peng, Y., Zhao, P., Zhang, Z., Liu, Y., Zhang, L., Zhao, P., 2024, Effect of P and Ce co-doping on the photocatalytic performance of $g-C_3N_4$: Experimental and theoretical studies, *Diamond and Related Materials*, 143, 110906.
- [51] Liu, E., Lin, X., Hong, Y., Yang, L., Luo, B., Shi, W., Shi, J., 2021, Rational copolymerization strategy engineered C self-doped $g-C_3N_4$ for efficient and robust solar photocatalytic H_2 evolution, *Renewable Energy*, 178, 757.
- [52] Zou, H., Yan, X., Ren, J., Wu, X., Dai, Y., Sha, D., Pan, J., Liu, J., 2015, Photocatalytic activity enhancement of modified $g-C_3N_4$ by ionothermal copolymerization, *Journal of Materiomics*, 1, 340.
- [53] Tong, Z., Yang, D., Shi, J., Nan, Y., Sun, Y., Jiang, Z., 2015, Three-dimensional porous aerogel constructed by $g-C_3N_4$ and graphene oxide nanosheets with excellent visible-light photocatalytic performance, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 7, 25693.
- [54] Mo, Z., Zhu, X., Jiang, Z., Song, Y., Liu, D., Li, H., Yang, X., She, Y., Lei, Y., Yuan, S., Li, H., Song, L., Yan, Q., Xu, H., 2019, Porous nitrogen-rich $g-C_3N_4$ nanotubes for efficient photocatalytic CO_2 reduction, *Applied Catalysis B: Environmental*, 256, 117854.
- [55] Zhou, X., Jin, B., Chen, R., Peng, F., Fang, Y., 2013, Synthesis of porous $Fe_3O_4/g-C_3N_4$ nanospheres as highly efficient and recyclable photocatalysts, *Materials Research Bulletin*, 48, 1447.
- [56] Fattahimoghaddam, H., Mahvelati-Shamsabadi, T., Lee, B.-K., 2021, Efficient photodegradation of Rhodamine B and tetracycline over robust and green $g-C_3N_4$ nanostructures: Supramolecular design, *Journal of Hazardous Materials*, 403, 123703.
- [57] Chen, Y., Zhai, B., Liang, Y., Li, Y., Li, J., 2019, Preparation of $CdS/g-C_3N_4/MOF$ composite with enhanced visible-light photocatalytic activity for dye degradation, *Journal of Solid State Chemistry*, 274, 32.
- [58] Balakrishnan, A., Chinthala, M., Polagani, R.K., Vo, D.-V.N., 2023, Removal of tetracycline from wastewater using $g-C_3N_4$

“Review article”

Design of multifunctional photocatalysts with g-C₃N₄ and its applications in sustainable technologies

Zahra Mohammadpour Koselar, Zohreh Ghazi Tabatabaei*

Department of Chemistry, Ahar Branch, Islamic Azad University, Ahar, Iran

*Corresponding author: zghazitabatabaei@yahoo.com

(Received: 28 November 2024, Accepted: 9 December 2024)

Abstract

Heterogeneous photocatalysts are utilized as a novel technology in energy conversion and storage, particularly in sustainable and green solar fuels, as well as in a variety of environmental applications. Graphitic carbon nitride (g-C₃N₄) photocatalysts form a specific group of heterogeneous photocatalysts due to their unique physicochemical, optical, and electrical properties. In this review, the fundamental mechanisms of heterogeneous photocatalysts, their advantages, challenges, and the design of g-C₃N₄-based photocatalysts are examined. The structural properties, surface physicochemical characteristics, surface stability, as well as their electrochemical, photoelectrochemical, and optical properties are highlighted. Key applications, such as pollutant degradation, carbon dioxide reduction, certain organic transformations, and disinfection, are also addressed. By reviewing significant advancements in this field, new opportunities for the design and fabrication of highly efficient g-C₃N₄-based photocatalysts for diverse applications are expected to arise.

Conflict of interest: None declared.

Keywords: Graphitic carbon nitride, Heterogeneous photocatalyst, Sustainable technologies, Photocatalyst design



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

دوره ۱، شماره ۳، پیاپی ۳
پاییز ۱۴۰۳، صفحات ۴۷-۶۲

"مقاله پژوهشی"

بررسی غلظت، منشأ و روابط فلزات سنگین در گرد و غبار منطقه سیستان: رویکردی نوین با استفاده از تحلیل‌های آماری

سیدمحمدصادق طبیب لقمانی^۱، محمدرضا رضایی کهخا^{۲*}، احمد شرافتی^۱، امین‌رضا نشاط^۳

۱. گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲. گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشگاه علوم پزشکی زابل، زابل، ایران

۳. گروه GIS/RS، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: rezaei@zamu.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۶/۲۸، پذیرش نهایی: ۱۴۰۳/۰۹/۱۰)

چکیده

این مطالعه به بررسی غلظت و منشأ فلزات سنگین در گرد و غبار منطقه سیستان، واقع در جنوب شرقی ایران، پرداخته است. نمونه‌برداری از ۱۴ ایستگاه در مناطق شهری، روستایی، صنعتی و کشاورزی به مدت یک سال انجام شد. غلظت ۱۴ فلز سنگین با استفاده از دستگاه پلاسمای جفت شده القایی (ICP) اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که منگنز با میانگین $463/01 \text{ mg/kg}$ بیش‌ترین غلظت را داشت، در حالی که مولیبدن با $1/79 \text{ mg/kg}$ کم‌ترین مقدار را نشان داد. تغییرات فصلی قابل توجهی مشاهده شد، که بیش‌ترین مقدار آن‌ها در فصل تابستان بدست آمد. فاکتور غنی‌شدگی (EF) برای آرسنیک، کروم و وانادیم به ترتیب $2/8$ ، $2/3$ و $2/1$ محاسبه شد که نشان‌دهنده غنی‌شدگی متوسط است. شاخص آلودگی (PI) برای این عناصر نیز آلودگی کم را نشان داد. تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) نشان داد که دو مؤلفه اول $94/8\%$ از تغییرپذیری داده‌ها را توضیح می‌دهند. بررسی روابط بین عناصر نشان داد که در اکثر موارد، مدل‌های غیرخطی با R^2 بالا و MSE کم، توصیف بهتری از روابط ارائه می‌دهند. آنالیز واریانس (ANOVA) نشان داد که ۷ عنصر از ۱۴ عنصر تغییرات معناداری در طول ماه‌های مختلف سال دارند ($p > 0/001$). این مطالعه با ارائه یک رویکرد جامع و نوآورانه، درک عمیق‌تری از وضعیت فلزات سنگین در گرد و غبار منطقه سیستان فراهم کرده است. یافته‌های این پژوهش می‌تواند به توسعه استراتژی‌های مدیریتی مؤثرتر برای کاهش آلودگی و حفاظت از سلامت عمومی در منطقه کمک کند.

واژه‌های کلیدی: فلزات سنگین، گرد و غبار، سیستان، آلودگی، محیط زیست

مقدمه

آلودگی هوا یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی در سطح جهانی است که سلامت انسان و اکوسیستم‌ها را به طور جدی تهدید می‌کند. بر اساس آمار سازمان بهداشت جهانی (WHO) در سال ۲۰۱۶ حدود ۹۱ درصد از جمعیت جهان در مناطقی زندگی می‌کنند که آلودگی هوا بیش از حد مجاز بود. این آمار نشان‌دهنده گستردگی و شدت مشکل آلودگی هوا در سراسر جهان است. سالانه میلیون‌ها نفر به دلیل مواجهه با آلاینده‌های مختلف موجود در هوا جان خود را از دست می‌دهند، که این آمار در سال ۲۰۱۹ حدود ۱۲ درصد از کل مرگ‌ومیرها را شامل می‌شود (۱). از میان آلاینده‌های هوا، فلزات سنگین به‌عنوان یکی از مهم‌ترین و خطرناک‌ترین گروه‌ها شناخته می‌شوند. این فلزات شامل کادمیوم، کروم، مس، نیکل، سرب، آرسنیک و سایر عناصر مشابه هستند که به دلیل خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاص خود، غیرقابل تجزیه بوده و می‌توانند در محیط زیست و بدن انسان تجمع یابند (۲).

فلزات سنگین به دلیل پایداری طولانی مدت در محیط زیست، قابلیت انتقال در زنجیره غذایی و اثرات سمی بر موجودات زنده، از اهمیت ویژه‌ای در مطالعات زیست‌محیطی برخوردار هستند (۳). با توجه به افزایش شهرنشینی و توسعه صنعتی، میزان فلزات سنگین در محیط‌های شهری به طور قابل توجهی افزایش یافته است. این فلزات از منابع مختلفی مانند فعالیت‌های صنعتی، ترافیک شهری، فعالیت‌های معدنی، استفاده از کودها و آفت‌کش‌های شیمیایی در کشاورزی، و حتی منابع طبیعی مانند آتشفشان‌ها به محیط وارد می‌شوند (۴). این آلاینده‌ها از طریق

استنشاق، تماس پوستی و یا بلع وارد بدن انسان شده و می‌توانند باعث بروز بیماری‌های حاد و مزمن نظیر اختلالات قلبی عروقی، بیماری‌های ژنتیکی، اختلالات عصبی و حتی سرطان شوند (۴). منطقه سیستان، واقع در جنوب شرقی ایران، با توجه به شرایط اقلیمی خاص خود، یکی از مناطقی است که به‌شدت تحت تأثیر آلودگی‌های ناشی از فلزات سنگین قرار دارد. این منطقه به دلیل وجود طوفان‌های گرد و غبار و بادهای شدید، به یکی از مهم‌ترین مناطق با آلودگی‌های گرد و غبار آلوده به فلزات سنگین تبدیل شده است (۵). سیستان با مساحتی حدود ۱۵۱۹۷ کیلومتر مربع، در محدوده جغرافیایی بین ۳۰ درجه و ۵ دقیقه تا ۳۱ درجه و ۲۸ دقیقه عرض شمالی و ۶۰ درجه و ۱۵ دقیقه تا ۶۱ درجه و ۵۰ دقیقه طول شرقی واقع شده است (۶). اقلیم خشک و نیمه‌خشک سیستان، همراه با بادهای ۱۲۰ روزه که از اواخر بهار تا اوایل پاییز می‌وزند، شرایط مساعدی را برای ایجاد و انتشار گرد و غبار فراهم می‌کند. این گرد و غبارها می‌توانند حاوی مقادیر قابل توجهی از فلزات سنگین باشند که منشأ آن‌ها می‌تواند طبیعی (مانند فرسایش خاک) یا انسانی (مانند فعالیت‌های صنعتی و کشاورزی) باشد (۷). تالاب بین‌المللی هامون، به عنوان بزرگ‌ترین دریاچه آب شیرین در فلات ایران، نقش مهمی در اکوسیستم منطقه سیستان ایفا می‌کند. این تالاب با مساحتی حدود ۵۷۰۰ کیلومتر مربع، در مواقع پرآبی نقش مهمی در تعدیل اقلیم منطقه و جلوگیری از گسترش بیابان‌زایی دارد (۸).

اما در سال‌های اخیر، به دلیل خشکسالی‌های متوالی و کاهش ورودی آب از رودخانه هیرمند، بخش وسیعی از این تالاب خشک شده است. این خشک

ذراتی مضر برای سلامت انسان هستند که به مشکلات تنفسی در منطقه دامن می‌زنند. این مطالعه توصیه می‌کند که برای کاهش اثرات نامطلوب این ذرات بر کیفیت هوا و سلامت عمومی، شناخت منبع و ترکیب این ذرات ضروری است.

فلزات سنگین موجود در گرد و غبار می‌توانند از منابع مختلفی سرچشمه بگیرند. برخی از این منابع عبارتند از: فرسایش طبیعی خاک (۱۱)، فعالیت‌های کشاورزی (۱۲)، فعالیت‌های صنعتی (۱۳)، ترافیک جاده‌ای (۱۴) و انتقال از مناطق دور دست (۱۵).

هدف اصلی این پژوهش، ارزیابی غلظت فلزات سنگین در گرد و غبار منطقه، تعیین منابع آلودگی و تحلیل تغییرات فصلی و ماهانه در غلظت این فلزات با استفاده از روش‌های آماری است. برای تعیین منشأ فلزات سنگین، از روش‌های آماری چند متغیره همچون تحلیل مؤلفه‌های اصلی^۱ (PCA) و تحلیل خوشه‌ای^۲ (CA) استفاده شد. این روش‌ها امکان شناسایی الگوهای مشترک در داده‌ها و گروه‌بندی فلزات با منشأ مشابه را فراهم می‌کنند (۱۶). همچنین، از شاخص‌های ژئوشیمیایی مانند فاکتور غنی‌شدگی^۳ (EF) و شاخص آلودگی^۴ (PI) برای ارزیابی میزان آلودگی و تعیین سهم منابع انسانی در انتشار فلزات سنگین استفاده شد (۱۷). این مطالعه به بررسی ارتباط بین تغییرات اقلیمی، خشکسالی‌های اخیر و غلظت فلزات سنگین در گرد و غبار منطقه سیستان می‌پردازد. انتظار می‌رود نتایج این تحقیق، ضمن ارائه تصویری جامع از وضعیت آلودگی فلزات سنگین در منطقه، به

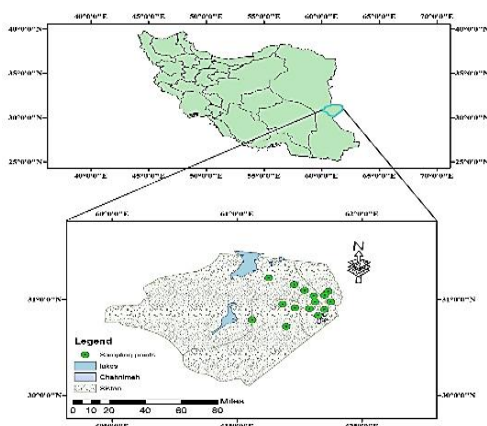
شدن نه تنها باعث از بین رفتن زیستگاه‌های طبیعی شده، بلکه به منبعی برای تولید گرد و غبار تبدیل شده است. صاحب‌زاده و همکاران (۹) با بررسی خطرات بهداشتی ناشی از رسوبات بادی هوابرد در سیستان، با تمرکز بر تأثیرات آن بر سلامت تنفسی و چشمی پرداختند. به دلیل بادهای قوی و مداوم، منطقه سیستان طوفان‌های گرد و غبار مکرری را تجربه می‌کند که عمدتاً از بسترهای خشک دریاچه هامون منشأ می‌گیرند. این مطالعه داده‌هایی از ۲۴۵۵ نفر که در دوره‌های بالای گرد و غبار در سال ۲۰۱۷ به دلیل مشکلات تنفسی و چشمی به مراکز درمانی مراجعه کرده‌اند، جمع‌آوری کرده بود. نتایج نشان داد که مناطقی نزدیک به مرز ایران و افغانستان، مانند دوست‌محمد و بزی‌الری، بالاترین خطرات بهداشتی را دارند. این مطالعه بر نیاز به مداخلات بهداشتی و مدیریت محیطی برای کاهش میزان قرارگیری در معرض گرد و غبار و کاهش اثرات بهداشتی در این مناطق پرخطر تأکید کرد. راشکی و همکاران (۱۰) ویژگی‌های کانی‌شناسی و شیمیایی گرد و غبار هوابرد در سیستان، جنوب شرقی ایران را برای ارزیابی تأثیرات زیست‌محیطی و بهداشتی آن بررسی نمودند. نتایج تحقیق نشان داد که از دیدگاه کانی‌شناسی، این گرد و غبار عمدتاً از کوارتز، کلسیت و مسکویت تشکیل شده و دارای غلظت‌های بالای CaO ، SiO_2 و Al_2O_3 است. آن‌ها نشان دادند که طوفان‌های گرد و غبار که عمدتاً از بسترهای خشک دریاچه هامون منشأ می‌گیرند، توسط فرسایش بادی تشدید شده و شامل

¹ Principal Component Analysis

² Cluster Analysis

³ Enrichment Factor

⁴ Pollution Index



شکل (۱): موقعیت جغرافیای منطقه مورد مطالعه و ایستگاه‌های نمونه‌برداری

نمونه‌برداری به صورت ماهانه و در هر ایستگاه انجام شد. برای اطمینان از یکنواختی شرایط نمونه‌برداری، تمامی نمونه‌ها در ساعات مشابهی از روز (بین ساعت ۱۰ صبح تا ۲ بعد از ظهر) و در شرایط جوی مشابه جمع‌آوری شدند. در مجموع، ۱۶۸ نمونه (۱۴ ایستگاه × ۱۲ ماه) در طول دوره مطالعه جمع‌آوری شد. برای جمع‌آوری نمونه‌های گرد و غبار، از دستگاه‌های پمپ نمونه‌بردار هوا استفاده شد. نمونه‌برداری در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین و با رعایت فاصله حداقل ۲۰ متری از موانع بزرگ (مانند ساختمان‌ها یا درختان) انجام شد. زمان نمونه‌برداری برای هر نمونه ۲۴ ساعت در نظر گرفته شد تا اطمینان حاصل شود که حجم کافی از گرد و غبار برای آنالیزهای بعدی جمع‌آوری می‌شود. فیلترهای مورد استفاده برای جمع‌آوری نمونه‌ها از جنس فایبرگلاس با قطر ۴۷ میلی‌متر و اندازه منافذ ۰/۸ میکرومتر بودند. قبل از نمونه‌برداری، فیلترها به مدت ۲۴ ساعت در دسیکاتور نگهداری شدند و سپس وزن آن‌ها با استفاده از ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۱ میلی‌گرم اندازه‌گیری شد. پس از نمونه‌برداری، فیلترها مجدداً در دسیکاتور

تدوین راهکارهای مدیریتی مؤثر برای کاهش اثرات زیست‌محیطی و بهداشتی این آلاینده‌ها کمک کند. این یافته‌ها می‌تواند در سیاست‌گذاری‌های زیست‌محیطی، برنامه‌ریزی‌های شهری و منطقه‌ای، و اقدامات حفاظتی در سیستان و مناطق مشابه مورد استفاده قرار گیرد.

بخش تجربی

این پژوهش با هدف بررسی جامع غلظت و منشأ فلزات سنگین در گرد و غبار منطقه سیستان انجام شد. مطالعه حاضر از یک رویکرد چند مرحله‌ای شامل نمونه‌برداری میدانی، آنالیز آزمایشگاهی، و تحلیل‌های آماری بهره می‌برد.

- طرح مطالعه و نمونه‌برداری

این مطالعه در طول یک دوره یک‌ساله از ژانویه تا دسامبر ۲۰۲۳ در منطقه سیستان انجام شد. منطقه سیستان، واقع در شمال شرقی استان سیستان و بلوچستان، به دلیل شرایط اقلیمی خاص خود، از جمله وجود بادهای ۱۲۰ روزه و خشکسالی‌های مکرر، مستعد تولید و انباشت گرد و غبار است. برای اطمینان از پوشش جامع منطقه، ۱۴ ایستگاه نمونه‌برداری انتخاب شدند. این ایستگاه‌ها شامل مناطق شهری (۵ ایستگاه)، روستایی (۵ ایستگاه)، صنعتی (۲ ایستگاه) و کشاورزی (۲ ایستگاه) بودند. موقعیت دقیق هر ایستگاه با استفاده از سیستم موقعیت‌یاب جهانی (GPS) ثبت شد. انتخاب ایستگاه‌ها بر اساس معیارهایی چون تراکم جمعیت، نوع کاربری زمین، جهت باد غالب و دسترسی به منطقه صورت گرفت که در شکل (۱) نشان داده شده‌اند.

اسپکترو اکروس مدل ۷۶۰۰ ساخت کشور آلمان استفاده شد. هر اندازه گیری سه بار تکرار گردید.

- تحلیل‌های آماری و شاخص‌های آلودگی

پس از جمع‌آوری داده‌های مربوط به غلظت فلزات سنگین، تحلیل‌های آماری گسترده‌ای با استفاده از نرم‌افزارهای SPSS نسخه ۲۶ و R نسخه ۴,۱,۰ انجام شد. ابتدا، آمار توصیفی شامل میانگین، میانه، انحراف معیار، حداقل و حداکثر برای هر فلز محاسبه شد. نرمال بودن توزیع داده‌ها با استفاده از آزمون Shapiro-Wilk بررسی شد و در صورت لزوم، از تبدیل لگاریتمی برای نرمال‌سازی داده‌ها استفاده شد. برای بررسی تفاوت‌های فصلی و مکانی در غلظت فلزات سنگین، از آنالیز واریانس یک‌طرفه (ANOVA) و آزمون تعقیبی Tukey استفاده شد. همبستگی بین غلظت فلزات مختلف با استفاده از ضریب همبستگی Pearson محاسبه شد. برای شناسایی منابع احتمالی فلزات سنگین، از تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) و تحلیل خوشه‌ای سلسله‌مراتبی (HCA) استفاده شد. PCA برای کاهش ابعاد داده‌ها و شناسایی الگوهای اصلی در توزیع فلزات سنگین به کار رفت، در حالی که HCA برای گروه‌بندی فلزات با منشأ مشابه استفاده شد.

علاوه بر این، دو شاخص مهم آلودگی یعنی فاکتور غنی‌شدگی (EF) و شاخص آلودگی (PI) به ترتیب مطابق با معادلات (۱) و (۲) محاسبه شدند:

$$EF = Sc/Rc \quad (1)$$

در معادله (۱)، Sc غلظت فلز مورد نظر و Rc غلظت عنصر در ماده مرجع است. نسبت این مقادیر در نمونه‌های گرد و غبار و پوسته زمین، میزان غنی‌شدگی

قرار داده شدند و وزن آن‌ها دوباره اندازه‌گیری شد. اختلاف وزن قبل و بعد از نمونه‌برداری، وزن گرد و غبار جمع‌آوری شده را مشخص می‌کند.

- آماده‌سازی نمونه‌ها

پس از جمع‌آوری، نمونه‌ها به آزمایشگاه منتقل شده و مراحل آماده‌سازی برای آنالیز شیمیایی آغاز شد. ابتدا، فیلترهای حاوی نمونه‌های گرد و غبار در دمای ۱۰۵ سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت در آون خشک شدند تا رطوبت آن‌ها به طور کامل از بین برود. سپس، نمونه‌ها با استفاده از هاون به صورت یکنواخت پودر شدند تا برای مرحله هضم اسیدی آماده شوند. برای هضم اسیدی نمونه‌ها، ۰/۵ گرم از هر نمونه پودر شده به یک بشر تفلونی ۱۰۰ میلی‌لیتری منتقل شد. سپس، ۱۰ میلی‌لیتر نیتریک اسید ۶۵ درصد و ۵ میلی‌لیتر کلریدریک اسید ۳۷ درصد به نمونه اضافه شد. مخلوط حاصل روی هات پلیت در دمای ۹۵ سانتی‌گراد به مدت ۲ ساعت حرارت داده شد. در طول این مدت، بشرها با شیشه ساعت پوشانده شدند تا از تبخیر بیش از حد اسیدها جلوگیری شود (۱۸). پس از اتمام فرآیند هضم، نمونه‌ها از طریق کاغذ صافی واتمن شماره ۴۲ فیلتر شدند و با آب دیونیزه به حجم ۵۰ میلی‌لیتر رسانده شدند. محلول‌های حاصل در ظروف پلی‌اتیلنی در دمای ۴ سانتی‌گراد تا زمان آنالیز با پلاسمای جفت شده القایی نگهداری شدند.

- اندازه‌گیری غلظت فلزات سنگین

برای اندازه‌گیری غلظت ۱۴ فلز سنگین مورد مطالعه (آرسنیک، سرب، کبالت، کروم، مس، لانتانیم، لیتیوم، منگنز، مولیبدن، نیکل، سرب، توریم، وانادیوم و روی) از دستگاه پلاسمای جفت شده القایی (ICP-OES)

$$MSE = \left(\frac{\sum (O_i - P_i)^2}{n} \right) \quad (4)$$

در این معادله n تعداد مشاهدات، P_i مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل و O_i مقدار مشاهده شده است. ضریب تعیین (R^2):

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (O_i - P_i)^2}{\sum (O_i - \bar{O})^2} \quad (5)$$

در این معادله \bar{O} میانگین مقادیر مشاهده شده و R^2 نشان‌دهنده درصدی از تغییرات در متغیر وابسته است که توسط مدل توضیح داده می‌شود. مقدار R^2 بین ۰ و ۱ متغیر است و مقادیر نزدیک به ۱ نشان‌دهنده برازش بهتر مدل است (۲۰). این شاخص‌های آماری برای هر یک از مدل‌های رگرسیون غیرخطی محاسبه شدند تا عملکرد مدل‌ها در پیش‌بینی غلظت فلزات سنگین بر اساس پارامترهای محیطی ارزیابی شود. مدل‌هایی با $MABE^3$ و $RMSE^4$ کم‌تر و R^2 بالاتر به عنوان مدل‌های بهینه در نظر گرفته شدند. استفاده از این شاخص‌های آماری امکان مقایسه عینی بین مدل‌های مختلف را فراهم می‌کند و به انتخاب بهترین مدل برای هر فلز سنگین کمک می‌کند. این ارزیابی‌ها همچنین می‌توانند برای شناسایی محدودیت‌های مدل‌ها و پیشنهاد بهبودهای آینده مورد استفاده قرار گیرند.

نتایج و بحث

جدول (۱) غلظت بدست آمده فلزات سنگین مورد مطالعه در این تحقیق را نشان می‌دهد. این نتایج برای درک وضعیت زیست‌محیطی و زمین‌شناختی منطقه بسیار ارزشمند است. همانطور که از نتایج موجود در جدول (۱) بر می‌آید، منگنز (Mn) با میانگین $463/01$

فلز را نشان می‌دهد. مقادیر EF به پنج دسته تقسیم شدند: $EF < 2$ (غنی‌شدگی کم)، $2 < EF < 5$ (غنی‌شدگی متوسط)، $5 < EF < 20$ (غنی‌شدگی قابل توجه)، $20 < EF < 40$ (غنی‌شدگی بسیار بالا) و $EF > 40$ (غنی‌شدگی شدید) (۱۹).

$$PI = \frac{C_m}{C_{standard}} \quad (2)$$

در معادله (۲)، C_m غلظت فلز در نمونه و $C_{standard}$ مقدار استاندارد فلز در محیط است. برای $C_{standard}$ از استانداردهای کیفیت خاک استفاده شده است. مقادیر PI به چهار دسته تقسیم شدند: $PI < 1$ (غیر آلوده)، $1 < PI < 3$ (آلودگی کم)، $3 < PI < 2$ (آلودگی متوسط) و $PI > 3$ (آلودگی شدید) (۱۹).

- مدل‌سازی رگرسیون غیرخطی

برای بررسی ارتباط بین غلظت فلزات سنگین و پارامترهای محیطی (دما و سرعت باد)، از مدل‌های رگرسیون غیرخطی استفاده شد. این مدل‌ها با استفاده از نرم‌افزار R و MATLAB توسعه داده شدند. دو مدل اصلی مورد استفاده قرار گرفت.

- ارزیابی آماری مدل‌ها

۱. معیار اطلاعات آکائیکه (AIC^1):

$$AIC = 2K - 2\ln(L) \quad (3)$$

در این معادله K تعداد پارامترها در مدل و L برآورد حداکثر درست‌نمایی برای مدل است.

۲. میانگین مربعات خطا $(MSE)^2$:

³ Mean Absolute Bias Error

⁴ Root Mean Square Error

¹Akaike Information Criterion

² Mean Squared Error

طور طبیعی در مقادیر کم و با توزیع نسبتاً یکنواخت در محیط وجود دارند.

آرسنیک (As) با میانگین ۵/۶۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم و ضریب تغییرات بالا (۰/۵۷)، تغییرپذیری قابل توجهی را نشان می‌دهد. این تغییرپذیری می‌تواند نشان‌دهنده منابع نقطه‌ای آلودگی یا تغییرات طبیعی در ژئوشیمی منطقه باشد. با توجه به سمیت آرسنیک، مناطق با غلظت‌های بالاتر باید با دقت بیشتری مورد بررسی قرار گیرند.

کبالت (Co) و مس (Cu) با میانگین‌های به ترتیب ۱۰/۸۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم و ۲۴/۰۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم، مقادیر متوسطی را نشان می‌دهند. این عناصر برای بسیاری از موجودات زنده ضروری هستند، اما در غلظت‌های بالا می‌توانند سمی باشند. توزیع نسبتاً یکنواخت آن‌ها (با ضرایب تغییرات ۰/۱۷ و ۰/۱۹) نشان می‌دهد که احتمالاً این ترکیبات منشأ طبیعی دارند و از آلودگی‌های نقطه‌ای ناشی نمی‌شوند.

لیتیم (Li) با میانگین ۲۶/۸۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم و چولگی مثبت (۰/۸۵)، توزیعی با دنباله به سمت راست را نشان می‌دهد. این می‌تواند نشان‌دهنده وجود برخی نقاط با غلظت‌های بالاتر لیتیم در منطقه باشد که ممکن است از نظر اقتصادی مهم باشند، به ویژه با توجه به افزایش تقاضایی که برای لیتیم در صنعت باتری‌سازی وجود دارد.

مولیبدن (Mo) با کم‌ترین میانگین (۱/۷۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و ضریب تغییرات نسبتاً بالا (۰/۳۶)، نشان می‌دهد که این عنصر به طور کلی در مقادیر کم وجود دارد اما توزیع آن در منطقه متغیر است. مولیبدن یک عنصر کمیاب است که در برخی سیستم‌های بیولوژیکی نقش مهمی ایفا می‌کند.

میلی‌گرم بر کیلوگرم بیش‌ترین مقدار را در میان عناصر مورد بررسی دارد. این عنصر نقش مهمی در فرآیندهای بیولوژیکی ایفا می‌کند و حضور آن در مقادیر بالا می‌تواند نشان‌دهنده خاک‌های غنی از مواد آلی یا سنگ‌های مادر غنی از منگنز باشد. با این حال، ضریب تغییرات پایین (۰/۰۳) نشان می‌دهد که توزیع منگنز در منطقه نسبتاً یکنواخت است.

میانگین غلظت کروم (Cr)، ۸۱/۸۲۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم بدست آمد. انحراف معیار ۱۴/۷۴ بدست آمده برای فلز کروم، نشان از تغییرپذیری قابل توجهی دارد. این تغییرپذیری می‌تواند ناشی از منابع طبیعی متنوع یا آلودگی‌های انسانی باشد. کروم در صنایع مختلف استفاده می‌شود و مقادیر بالای آن می‌تواند نگران‌کننده باشد، زیرا برخی از اشکال آن سمی هستند. وانادیم (V) و روی (Zn) با میانگین‌های نزدیک به هم (به ترتیب ۶۲/۸۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم و ۶۰/۰۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و ضرایب تغییرات پایین، توزیع نسبتاً یکنواختی را نشان می‌دهند. این می‌تواند نشان‌دهنده منشأ زمین‌شناختی مشترک یا شرایط محیطی یکسان برای این دو عنصر باشد. نیکل (Ni) با میانگین ۴۹/۳۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم، چولگی منفی قابل توجه (۱/۸۳-) و کشیدگی بالا (۷/۸۵) را نشان می‌دهد. این آمار نشان می‌دهد که توزیع نیکل غیرعادی است و نشان‌دهنده نقاط آلودگی موضعی یا تغییرات زمین‌شناختی قابل توجه در منطقه باشد.

سریم (Ce) و لانتانیم (La)، که هر دو از عناصر خاکی کمیاب هستند، الگوهای مشابهی را نشان می‌دهند. میانگین‌های نسبتاً پایین (به ترتیب ۳۷/۴۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم و ۲۰/۵۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و ضرایب تغییرات کم نشان می‌دهد که این عناصر به

سرب (Pb) با میانگین ۱۶/۵۴ میلی گرم بر کیلوگرم و چولگی منفی اندک (۰/۲۸)، توزیعی نسبتاً متقارن را نشان می‌دهد. با توجه به اثرات سمی سرب، حتی در غلظت‌های پایین، مناطق با غلظت‌های بالاتر باید از نظر منابع احتمالی آلودگی مورد بررسی قرار گیرند. توریم (Th) با میانگین ۹/۸۱ میلی گرم بر کیلوگرم و کشیدگی منفی (۰/۴۰-)، توزیعی نسبتاً پهن را نشان می‌دهد. این عنصر رادیواکتیو به طور طبیعی در بسیاری از سنگ‌ها و خاک‌ها یافت می‌شود و می‌تواند شاخصی برای فعالیت‌های زمین‌شناختی خاص باشد. در مجموع، این داده‌ها تصویر جامعی از توزیع عناصر

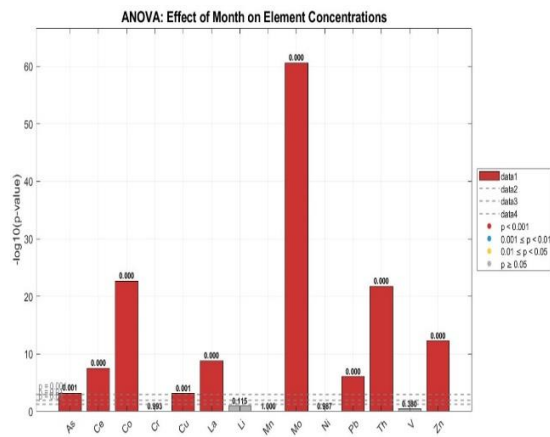
سنگین در منطقه مورد مطالعه ارائه می‌دهند. الگوهای مشاهده شده می‌توانند برای شناسایی مناطق با پتانسیل آلودگی، ارزیابی خطرات زیست‌محیطی و درک بهتر زمین‌شناسی منطقه مورد استفاده قرار گیرند. همچنین، این اطلاعات می‌توانند برای طراحی برنامه‌های نظارتی و مدیریتی در آینده مفید باشند. با این حال، برای درک کامل‌تر وضعیت، بررسی‌های بیش‌تر از جمله مطالعه توزیع مکانی این عناصر، بررسی منابع احتمالی (طبیعی و انسانی) و ارزیابی اثرات زیست‌محیطی و بهداشتی آنها ضروری است.

جدول (۱): مقادیر آماری سالانه غلظت فلزات سنگین گرد و غبار منطقه سیستان (میلی گرم بر کیلوگرم)

عنصر	Mean	Std Dev	C.V.	Min	Max	Skewness	Kurtosis
As	۵/۶۸	۳/۲۴	۰/۵۷	۰/۰۰	۱۲/۹۰	۰/۶۲	-۰/۶۱
Ce	۳۷/۴۹	۲/۶۲	۰/۰۷	۳۲/۱۰	۴۴/۸۰	۰/۵۵	۰/۱۷
Co	۱۰/۸۹	۱/۸۶	۰/۱۷	۵/۷۰	۱۵/۰۰	-۰/۲۳	-۰/۲۵
Cr	۸۱/۲۷	۱۴/۷۴	۰/۱۸	۵۲/۹۹	۱۰۰/۹۰	-۰/۳۶	-۱/۲۷
Cu	۲۴/۰۳	۴/۴۵	۰/۱۹	۱۴/۲۴	۳۲/۸۰	-۰/۰۶	-۰/۷۷
La	۲۰/۵۶	۲/۲۰	۰/۱۱	۱۶/۵۰	۲۶/۳۰	۰/۴۴	-۰/۲۱
Li	۲۶/۸۱	۲/۸۰	۰/۱۰	۲۱/۵۰	۳۳/۷۲	۰/۸۵	۰/۰۲
Mn	۴۶۳/۰۱	۱۲/۲۹	۰/۰۳	۴۴۸/۵۰	۴۸۶/۳۲	۰/۵۵	-۱/۳۶
Mo	۱/۷۹	۰/۶۴	۰/۳۶	۰/۷۰	۳/۵۲	۰/۴۸	-۰/۲۸
Ni	۴۹/۳۱	۱۱/۰۱	۰/۲۲	۱/۵۲	۶۷/۳۲	-۱/۸۳	۷/۸۵
Pb	۱۶/۵۴	۳/۰۴	۰/۱۸	۹/۹۰	۲۳/۶۲	-۰/۲۸	-۰/۶۰
Th	۹/۸۱	۱/۳۸	۰/۱۴	۶/۴۹	۱۳/۳۰	۰/۰۶	-۰/۴۰
V	۶۲/۸۶	۳/۶۷	۰/۰۶	۵۴/۹۰	۷۱/۸۰	-۰/۳۹	-۰/۳۶
Zn	۶۰/۰۷	۳/۰۹	۰/۰۵	۵۳/۴۹	۶۹/۳۵	۰/۴۵	۰/۳۰

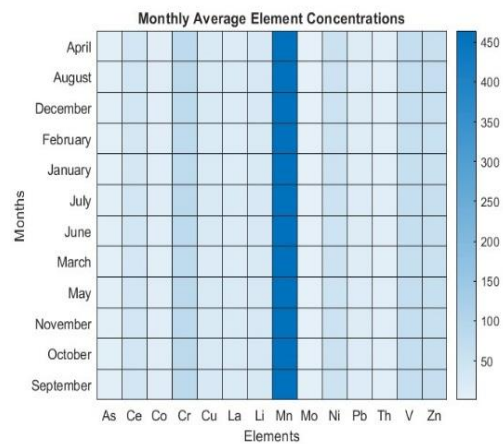
همچنین اثر ماه نمونه‌برداری بر غلظت عناصر نیکل، وانادیوم، کروم، لیتیم و منگنز معنادار نمی‌باشد (۰/۰۵ > p). بطور کلی بیش از نیمی از عناصر (۹ از ۱۴) تغییرات معناداری در طول ماه‌ها نشان می‌دهند، که نشان می‌دهد عوامل فصلی به شدت بر غلظت آن‌ها تأثیر می‌گذارند. کم‌تر از نیمی از عناصر (۵ از ۱۴) تغییرات ماهانه معناداری نشان نمی‌دهند، که نشان می‌دهد غلظت آن‌ها در طول سال نسبتاً ثابت می‌ماند یا تغییرات آن‌ها از نظر آماری معنادار نیست.

این نتایج نشان می‌دهد که عوامل محیطی که با فصول تغییر می‌کنند (مانند دما، بارندگی یا فعالیت‌های بیولوژیکی) تأثیر قابل توجهی بر غلظت برخی از عناصر مورد مطالعه دارند، در حالی که برخی دیگر به نظر می‌رسد کم‌تر تحت تأثیر این تغییرات فصلی قرار می‌گیرند.



شکل (۳): نمودار تغییرات p-value تأثیر ماه بر غلظت فلزات سنگین گرد و غبار

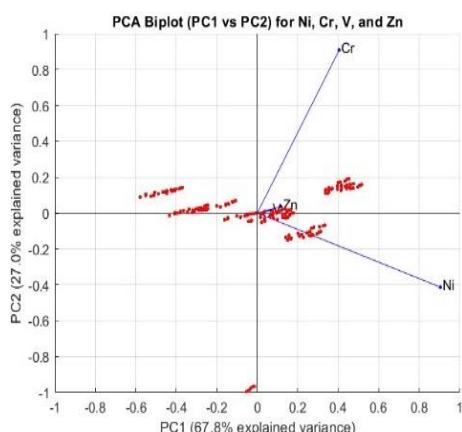
شکل (۴) تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) الگوهای توزیع و همبستگی عناصر نیکل (Ni)، کروم (Cr)، وانادیوم (V) و روی (Zn) را نشان می‌دهد. مؤلفه اصلی اول (PC1)، ۶۷/۸٪ و مؤلفه دوم (PC2)، ۲۷٪ از



شکل (۲): میانگین ماهانه غلظت عناصر در طول سال

شکل (۲) تغییرات فصلی غلظت فلزات سنگین در منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. در فصل بهار، غلظت‌ها از سطح نسبتاً پایین شروع به افزایش می‌کنند. در فصل تابستان غلظت اکثر فلزات به بالاترین مقدار می‌رسد. در فصل پاییز، روند کاهشی غلظت فلزات سنگین آغاز می‌شود، بطوریکه در زمستان کم‌ترین غلظت‌ها بدست می‌آید. این الگو نشان‌دهنده ارتباط بین شرایط آب و هوایی و غلظت فلزات سنگین است. به دلیل افزایش فعالیت‌های گرد و غباری و فرسایش بادی در فصول گرم، افزایش غلظت فلزات سنگین در تابستان دیده شد. این تحلیل می‌تواند برای درک بهتر منابع و مکانیسم‌های انتشار فلزات سنگین و تدوین استراتژی‌های مدیریتی مناسب در فصول مختلف مفید باشد.

شکل (۳) نمودار ANOVA برای بررسی تأثیر ماه نمونه‌برداری بر غلظت فلزات سنگین موجود در گرد و غبار را نشان می‌دهد. همانطور که از شکل بر می‌آید، اثر ماه نمونه‌برداری بر غلظت عناصر آرسنیک، کبالت، مس، مولیبدن، سرب، سرب، لانتانوم، توریم و روی معنادار است ($p < 0.001$).



شکل (۴): تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) الگوهای توزیع و همبستگی عناصر فلزی نیکل (Ni)، کروم (Cr)، وانادیم (V) و روی (Zn) در نمونه‌های محیطی

- فاکتور غنی‌شدگی (EF)

فاکتور غنی‌شدگی برای تعیین منابع احتمالی طبیعی یا انسانی فلزات در گرد و غبار استفاده می‌شود. در این مطالعه، از عنصر لیتیم (Li) به عنوان عنصر مرجع استفاده شده است، زیرا تغییرات کم‌تری در محیط دارد و کم‌تر تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی قرار می‌گیرد. نتایج محاسبات EF برای فلزات مختلف نشان می‌دهد که به غیر از وانادیوم، کروم و آرسنیک که فاکتور غنی‌شدگی متوسط دارند، بقیه فلزات بررسی شده دارای فاکتور غنی‌شدگی کم هستند (جدول (۲)).

واریانس داده‌ها را توضیح می‌دهند، که مجموعاً ۹۴/۸٪ از تغییرپذیری داده‌ها را پوشش می‌دهند. کروم و نیکل بیش‌ترین تأثیر را بر PC1 دارند، اما در جهات مخالف، که نشان‌دهنده همبستگی منفی قوی بین آنهاست. وانادیم و روی تأثیر کم‌تری بر PC1 دارند و بیش‌تر با PC2 مرتبط هستند. پراکندگی نقاط قرمز که نمونه‌های فردی را نشان می‌دهند، حاکی از تنوع زیاد در داده‌هاست، که بیش‌تر تمرکز در مقادیر مثبت PC1 و PC2 است. این الگو می‌تواند نشان‌دهنده منابع مختلف این عناصر یا شرایط محیطی متفاوت در نمونه‌برداری باشد. برای درک کامل‌تر، بررسی اطلاعات زمینه‌ای مانند موقعیت جغرافیایی و شرایط محیطی نمونه‌برداری ضروری است.

میری و همکاران (۲۱) عوامل اقلیمی و زمینی مؤثر بر طوفان‌های گرد و غبار در منطقه سیستان ایران را طی ۲۳ سال (۱۹۹۷-۲۰۱۹) بررسی کردند. این مطالعه نشان داد که طوفان‌های گرد و غبار در تابستان به دلیل بادهای شدید، بارندگی کم و پوشش گیاهی اندک، بیش‌ترین شدت را دارند. بسترهای خشک دریاچه هامون، به‌ویژه هامون صابری، به عنوان منابع اصلی گرد و غبار عمل می‌کنند که به دلیل کاهش جریان آب از رودخانه‌های افغانستان تشدید شده‌اند. بیش‌ترین فعالیت گرد و غبار بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۴ رخ داده است که با خشکسالی شدید هم‌زمان بوده است. توصیه‌های کلیدی شامل مدیریت پایدار منابع آبی و احیای پوشش گیاهی در منطقه هامون برای کاهش تأثیرات طوفان‌های گرد و غبار است.

در مناطق شهری ناشی از فعالیت‌های انسانی می‌باشد که دارای ریسک اکولوژیک متوسط هستند.

- شاخص آلودگی (PI)

شاخص آلودگی برای هر فلز به صورت جداگانه محاسبه شده و نتایج در جدول (۳) آورده شده است.

جدول (۳): شاخص آلودگی عناصر موجود در گرد و غبار

سیستان		
عنصر	شاخص آلودگی (PI)	شدت آلودگی
As	۱/۶	(آلودگی کم)
Ce	۱	(آلودگی کم)
Co	۰/۷	(غیر آلوده)
Cr	۱/۴	(آلودگی کم)
Cu	۱/۱	(آلودگی کم)
La	۰/۵	(غیر آلوده)
Li	۱/۰	(غیر آلوده)
Mn	۰/۸	(غیر آلوده)
Mo	۰/۷	(غیر آلوده)
Ni	۰/۹	(غیر آلوده)
Pb	۰/۷	(غیر آلوده)
Th	۰/۵	(غیر آلوده)
V	۱/۳	(آلودگی کم)
Zn	۱/۱	(آلودگی کم)

بر اساس نتایج شاخص آلودگی، می‌توان گفت که اکثر فلزات مورد بررسی غیر آلوده هستند. با این حال، آرسنیک (As)، کروم (Cr)، مس (Cu)، وانادیوم (V) و روی (Zn) دارای آلودگی کم هستند که نیاز به توجه بیش‌تری دارند. دهقانی و همکاران (۲۴) با بررسی گرد و غبار تهران نتیجه گرفتند که آلودگی سه عنصر مس، سرب و روی در گرد و غبار ناشی از منابع انسان‌ساز ماند فرسودگی لاستیک خودروها، ساییدگی ترمزها و احتراق سوخت‌های فسیلی است.

جدول (۲): فاکتور غنی‌شدگی عناصر موجود در گرد و غبار

سیستان		
عنصر	فاکتور غنی‌شدگی (EF)	شدت
As	۲/۸	(غنی‌شدگی متوسط)
Ce	۱/۲	(غنی‌شدگی کم)
Co	۰/۹	(غنی‌شدگی کم)
Cr	۲/۳	(غنی‌شدگی متوسط)
Cu	۱/۸	(غنی‌شدگی کم)
La	۰/۷	(غنی‌شدگی کم)
Mn	۱/۴	(غنی‌شدگی کم)
Mo	۱/۱	(غنی‌شدگی کم)
Ni	۱/۵	(غنی‌شدگی کم)
Pb	۱/۲	(غنی‌شدگی کم)
Th	۰/۸	(غنی‌شدگی کم)
V	۲/۱	(غنی‌شدگی متوسط)
Zn	۱/۹	(غنی‌شدگی کم)

بر اساس جدول (۲)، می‌توان گفت که اکثر فلزات مورد بررسی دارای غنی‌شدگی حداقل هستند، که نشان‌دهنده منشأ عمدتاً طبیعی آن‌ها در گرد و غبار است. با این حال، آرسنیک (As)، کروم (Cr) و وانادیوم (V) دارای غنی‌شدگی متوسط هستند که می‌تواند نشان‌دهنده تأثیر نسبی فعالیت‌های انسانی بر غلظت این فلزات در گرد و غبار باشد. مطالعات مشابه در نقاط دیگر نتایج مشابه و متفاوتی از این یافته‌ها را نشان می‌دهد. به‌عنوان مثال، قنواتی و همکاران (۲۲) با بررسی گرد و غبار آبادان به این نتیجه رسیدند که فلزات سنگین روی و کروم دارای ریسک اکولوژیکی پایینی هستند در حالیکه ریسک اکولوژیک آرسنیک متوسط و ریسک اکولوژیک سرب بالا می‌باشد. دیاز ریزو و همکاران (۲۳) با بررسی گرد و غبار هاوانا در کوبا به این نتیجه رسیدند که غلظت زیاد سرب و روی

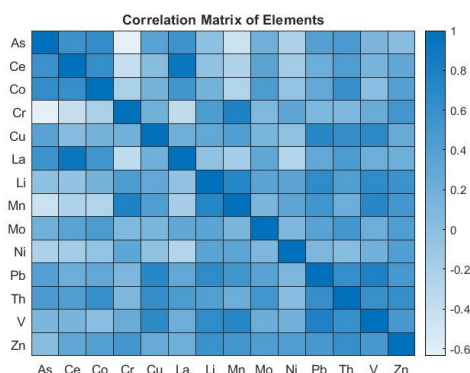
روابط خطی و غیرخطی بین عناصر

برای یافتن مناسب‌ترین روابط خطی و غیرخطی بین عناصر، ابتدا باید ماتریس همبستگی بین عناصر مختلف بدست آورده شود. سپس برای چهار عنصری که بیش‌ترین همبستگی را با سایر عناصر دارند، روابط خطی و غیرخطی پیشنهاد می‌شود.

روابط خطی و غیرخطی پیشنهادی بین عناصر در جدول (۴) ارائه شده است.

جدول (۴): روابط خطی و غیرخطی بین غلظت فلزات سنگین موجود در گرد و غبار

عنصر	معادله خطی	معادله غیرخطی
Ni	$Ni = -18.2515 + 0.356 \times Cu - 0.609 \times Cr + 0.8707 \times V$	$Ni = -3.6010 + 0.0023 \times Cu^2 - 13.2412 \times \ln(Cr) + 42.8951 \times e^{(V/100)}$
Cr	$Cr = -389.56 + 1.2982 \times Ni + 0.2564 \times V - 2.2802 \times Mn$	$Cr = -6907458 + 54.2400 \times Ni^{0.5} + 17.1699 \times \ln(V) - 133.5185 \times Mn^{0.3}$
V	$V = 29.6193 - 0.0219 \times Ni + 0.067 \times Cr + 0.5225 \times Zn$	$V = 11.3282 - 2.4548 \times \log(Ni) + 0.9682 \times Cr^{0.5} + 30.3684 \times e^{(Zn/100)}$
Zn	$Zn = 38.9342 - 0.1793 \times Cu + 0.3942 \times Pb + 0.3011 \times V$	$Zn = 33.7287 - 0.355 \times Cu^{0.8} + 4.1694 \times \ln(Pb) + 0.1336 \times V^{1.2}$



شکل (۵): ماتریس همبستگی عناصر در نمونه‌های محیطی

بر اساس بررسی اولیه داده‌ها از شکل (۵)، به نظر می‌رسد عناصر نیکل، کروم، وانادیوم و روی همبستگی نسبتاً خوبی با سایر عناصر دارند.

همچنین آنالیزهای آماری مربوط به روابط خطی و غیرخطی عناصر در جدول (۵) آورده شده است.

جدول (۵): آنالیز آماری مربوط به روابط خطی و غیرخطی عناصر موجود در گرد و غبار

عنصر	AIC_خطی	AIC_غیرخطی	R ² _خطی	R ² _غیرخطی	MSE_خطی	MSE_غیرخطی
Ni	۴۸۸/۵۹	۴۸۴/۹۶	۰/۶۷	۰/۶۸	۱۷/۴۷	۱۷/۱۰
Cr	۶۴۰/۲۵	۶۳۲/۰۱	۰/۸۰	۰/۸۱	۴۳/۰۹	۴۱/۰۳
V	۳۹۶/۶۵	۳۹۵/۱۶	۰/۲۴	۰/۲۵	۱۰/۱۱	۱۰/۰۲
Zn	۳۲۷/۰۹	۳۳۲/۵۹	۰/۳۰	۰/۲۷	۶/۶۸	۶/۹۰

معادلات روابط بین عنصر مورد نظر و سایر عناصر را نشان می‌دهند.

برای ارزیابی کارایی این مدل‌ها، در جدول (۵)، سه معیار آماری استفاده شده است: معیار اطلاعات آکائیکه (AIC)، ضریب تعیین (R²) و میانگین مربعات خطا

در جدول (۴)، مقایسه بین مدل‌های خطی و غیرخطی برای چهار عنصر شیمیایی نیکل، کروم، وانادیوم و روی ارائه شده است. هر عنصر با دو معادله توصیف می‌شود: یکی خطی و دیگری غیرخطی. این

و غبار این طوفان‌ها به‌طور قابل توجهی بر کیفیت هوا و سلامت عمومی در مناطق تحت تأثیر اثر می‌گذارد و نقشی در تغییر محیط‌های جوی و دریایی ایفا می‌کند، به طوری که در دوره‌های با فراوانی بالای طوفان‌های گرد و غبار، عمق نوری آتروسول‌ها بر فراز شمال دریای عرب افزایش می‌یابد.

این نتایج نشان می‌دهد که روابط بین این عناصر و متغیرهای پیش‌بینی کننده آن‌ها اغلب پیچیده‌تر از روابط خطی ساده هستند. مدل‌های غیرخطی با در نظر گرفتن این پیچیدگی‌ها، معمولاً قادر به توصیف بهتر این روابط هستند. با این حال، مورد روی یادآور این نکته است که همیشه باید هر دو نوع مدل را بررسی کرد، زیرا گاهی مدل ساده‌تر خطی می‌تواند عملکرد بهتری داشته باشد.

نتیجه‌گیری

با توجه به یافته‌های این پژوهش، تصویر جامعی از وضعیت فلزات سنگین در گرد و غبار منطقه سیستان به دست آمد. نتایج نشان داد که غلظت این فلزات دارای تغییرات فصلی قابل توجهی است، به طوری که بیش‌ترین مقادیر در فصل تابستان مشاهده شد. این الگوی فصلی احتمالاً به دلیل افزایش فعالیت‌های گرد و غباری و فرسایش بادی در فصول گرم است. تحلیل فاکتور غنی‌شدگی (EF) و شاخص آلودگی (PI) نشان داد که اگرچه اکثر فلزات مورد بررسی منشأ طبیعی دارند، برخی عناصر مانند آرسنیک، کروم و وانادیم نشانه‌هایی از تأثیر فعالیت‌های انسانی را نشان می‌دهند که نیاز به مطالعات بیشتر و اقدامات احتمالی برای کاهش انتشار آن‌ها دارند. تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) امکان شناسایی الگوهای اصلی در توزیع

(MSE). AIC کمتر، R^2 بالاتر و MSE کم‌تر نشان‌دهنده برازش بهتر مدل است.

در مورد نیکل، مدل غیرخطی با AIC ۴۸۴/۹۶ در مقابل ۴۸۸/۵۹ مدل خطی، R^2 ۰/۶۸ در مقابل ۰/۶۷ و MSE ۱۷/۱۰ در مقابل ۱۷/۴۷، عملکرد بهتری نشان می‌دهد. این الگو برای کروم نیز تکرار می‌شود، جایی که مدل غیرخطی با AIC ۶۳۲/۰۱، R^2 ۰/۸۱ و MSE ۴۱/۰۳ در مقابل مقادیر ۶۴۰/۲۵، R^2 ۰/۸۰ و ۴۳/۰۹ برای مدل خطی، برتری دارد.

وانادیم نیز الگوی مشابهی را نشان می‌دهد، اگرچه تفاوت‌ها خیلی کم است. مدل غیرخطی با AIC ۳۹۵/۱۶، R^2 ۰/۲۵ و MSE ۱۰/۰۲ در مقابل مقادیر ۳۹۶/۶۵، R^2 ۰/۲۴ و برای مدل خطی، اندکی بهتر عمل می‌کند.

روی تنها استثنا در این مجموعه بود. برای این عنصر، مدل خطی با AIC ۳۲۷/۰۹، R^2 ۰/۳۰ و MSE ۶/۶۸ در مقابل مقادیر ۳۳۲/۵۹، R^2 ۰/۲۷ و ۶/۹۰ برای مدل غیرخطی، عملکرد بهتری نشان می‌دهد.

راشکی و همکاران (۲۵) با بررسی پویایی‌های فصلی و ویژگی‌های انتقال طوفان‌های گرد و غبار که از منطقه سیستان در جنوب شرقی ایران در سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۲ منشأ می‌گیرند، نشان دادند که طوفان‌های گرد و غبار در تابستان، به‌ویژه در ماه‌های ژوئن و ژوئیه، به دلیل بادهای شدید فصلی معروف به "باد لوار" یا "باد ۱۲۰ روزه" بیش‌ترین فراوانی را دارند. تحلیل‌های ماهواره‌ای نشان داد که ستون‌های گرد و غبار سیستان مسیری به شکل U را طی می‌کنند، ابتدا به سمت جنوب حرکت کرده و سپس به سمت شرق-شمال‌شرق به سوی دریای عرب منحرف می‌شوند و گاه تا مناطقی در هند تأثیر می‌گذارند. گرد

تعارض منافع

نویسندگان هیچگونه تعارض منافی برای اعلام ندارند.

منابع

- [1] Shen, X., Dai, M., Yang, J., Sun, L., Tan, X., Peng, C., Ali, I., Naz, I., 2022, A critical review on the phytoremediation of heavy metals from environment: Performance and challenges, *Chemosphere*, 291, 132979.
- [2] Latif, A., Sheng, D., Sun, K., Si, Y., Azeem, M., Abbas, A., Bilal, M., 2020, Remediation of heavy metals polluted environment using Fe-based nanoparticles: Mechanisms, influencing factors, and environmental implications, *Environmental Pollution*, 264, 114728.
- [3] Mitra, S., Chakraborty, A.J., Tareq, A.M., Emran, T.B., Nainu, F., Khusro, A., Idris, A.M., Khandaker, M.U., Osman, H., Alhumaydhi, F.A., Simal-Gandara, J., 2022, Impact of heavy metals on the environment and human health: Novel therapeutic insights to counter the toxicity, *Journal of King Saud University - Science*, 34, 101865.
- [4] Jin, M., Yuan, H., Liu, B., Peng, J., Xu, L., Yang, D., 2020, Review of the distribution and detection methods of heavy metals in the environment, *Analytical Methods*, 12, 5747.
- [5] Dahmardeh Behrooz, R., Kaskaoutis, D.G., Grivas, G., Mihalopoulos, N., 2021, Human health risk assessment for toxic elements in the extreme ambient dust conditions observed in Sistan, Iran, *Chemosphere*, 262, 127835.
- [6] Kiran, Bharti, R., Sharma, R., 2022, Effect of heavy metals: An overview, *Materials Today: Proceedings*, 51, 880.
- [7] Shi, T., Wang, Y., 2021, Heavy metals in indoor dust: Spatial distribution, influencing factors, and potential health risks, *Science of the Total Environment*, 755, 142367.
- [8] Rad, A.M., Kreidler, J., Abatzoglou, J.T., Fallon, K., Roche, K.R., Sadegh, M., 2022, Anthropogenic stressors compound climate impacts on inland lake dynamics: The case of Hamun Lakes, *Science of the Total Environment*, 829, 154419.
- [9] Sahebzadeh, B., Shabani-Goraji, K., Shoaie, Z., Afshari, M., 2019, Statistical study of eolian sediment distribution risk in human ecosystems on the health of respiratory system and the eyes

فلزات سنگین را فراهم کرد و نشان داد که عناصری مانند کروم و نیکل دارای همبستگی منفی قوی هستند، در حالی که وانادیم و روی ارتباط نزدیکتری با یکدیگر دارند. این یافته‌ها می‌تواند به درک بهتر منابع و رفتار این عناصر در محیط کمک کند. همچنین در این مطالعه، روابط خطی و غیرخطی بین عناصر بررسی شد. نتایج نشان داد که در اکثر موارد، مدل‌های غیرخطی توصیف بهتری از روابط بین عناصر ارائه می‌دهند. این یافته نشان‌دهنده پیچیدگی تعاملات بین فلزات سنگین در محیط است و اهمیت استفاده از رویکردهای پیشرفته آماری در مطالعات زیست‌محیطی را برجسته می‌کند. تحلیل واریانس (ANOVA) نشان داد که بیش از نیمی از عناصر مورد مطالعه تغییرات معناداری در طول ماه‌های مختلف سال نشان می‌دهند، در حالی که نیمی دیگر نسبتاً ثابت باقی می‌مانند. این یافته اهمیت در نظر گرفتن تغییرات فصلی در مطالعات مربوط به آلودگی هوا و برنامه‌های نظارتی را نشان می‌دهد. متأسفانه به دلیل کمبود بودجه امکان خرید تجهیزات نمونه برداری با حجم بالا برای این تحقیق میسر نبود. ضمناً شرایط بسیار حاد گرمایی و طوفانی در بعضی روزها نمونه برداری را با مشکل روبرو می‌ساخت. این مطالعه با ارائه یک رویکرد جامع و نوآورانه به بررسی فلزات سنگین در گرد و غبار، گامی مهم در جهت درک بهتر وضعیت زیست‌محیطی منطقه سیستان برداشته است. با توجه به اهمیت روزافزون مسائل زیست‌محیطی و تأثیر آن‌ها بر سلامت انسان و اکوسیستم‌ها، چنین مطالعاتی نقش حیاتی در ارتقای دانش ما و بهبود استراتژی‌های مدیریت محیط زیست ایفا می‌کنند.

- [19] Zhang, H., Zhang, F., Song, J., Tan, M.L., Kung, H., Johnson, V.C., 2021, Pollutant source, ecological and human health risks assessment of heavy metals in soils from coal mining areas in Xinjiang, China, *Environmental Research*, 202, 111702.
- [20] Duan, Z., Wang, J., Cai, X., Wu, Y., Xuan, B., 2020, Spatial distribution and human health risk assessment of heavy metals in campus dust: A case study of the university town of Huaxi, *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 26, 986.
- [21] Miri, A., Maleki, S., Middleton, N., 2021, An investigation into climatic and terrestrial drivers of dust storms in the Sistan region of Iran in the early twenty-first century, *Science of the Total Environment*, 757, 143952.
- [22] Ghanavati, N., Nazarpour, A., Watts, M.J., 2019, Status, source, ecological and health risk assessment of toxic metals and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in street dust of Abadan, Iran, *Catena*, 177, 246.
- [23] Díaz Rizo, O., Casanova Díaz, A.O., Torres Ramos, A.G., Ramos López, D., 2023, Heavy metals concentration, pollution indexes, and health risk assessment of urban road dust in the historical center of Havana, Cuba, *Environmental Monitoring and Assessment*, 195, 349.
- [24] Dehghani, S., Moore, F., Keshavarzi, B., Hale, B.A., 2017, Health risk implications of potentially toxic metals in street dust and surface soil of Tehran, Iran, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 136, 92.
- [25] Rashki, A., Kaskaoutis, D.G., Francois, P., Kosmopoulos, P.G., Legrand, M., 2015, Dust-storm dynamics over Sistan region, Iran: Seasonality, transport characteristics and affected areas, *Aeolian Research*, 16, 35.
- of inhabitants of Sistan, East Iran, *Arabian Journal of Geosciences*, 12, 227.
- [10] Rashki, A., Eriksson, P.G., Rautenbach, C.J.D.W., Kaskaoutis, D.G., Grote, W., Dykstra, J., 2013, Assessment of chemical and mineralogical characteristics of airborne dust in the Sistan region, Iran, *Chemosphere*, 90, 227.
- [11] Dahmardeh Behrooz, R., Esmaili-Sari, A., Bahramifar, N., Kaskaoutis, D.G., 2017, Analysis of the TSP, PM10 concentrations and water-soluble ionic species in airborne samples over Sistan, Iran during the summer dusty period, *Atmospheric Pollution Research*, 8, 403.
- [12] Doabi, S.A., Karami, M., Afyuni, M., Yeganeh, M., 2018, Pollution and health risk assessment of heavy metals in agricultural soil, atmospheric dust and major food crops in Kermanshah province, Iran, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 163, 153.
- [13] Men, C., Liu, R., Wang, Q., Guo, L., Shen, Z., 2018, The impact of seasonal varied human activity on characteristics and sources of heavy metals in metropolitan road dusts, *Science of the Total Environment*, 637, 844.
- [14] Wei, B., Yang, L., 2010, A review of heavy metal contaminations in urban soils, urban road dusts and agricultural soils from China, *Microchemical Journal*, 94, 99.
- [15] Mirzaei Aminiyan, M., Baalousha, M., Mousavi, R., Mirzaei Aminiyan, F., Hosseini, H., Heydariyan, A., 2018, The ecological risk, source identification, and pollution assessment of heavy metals in road dust: A case study in Rafsanjan, SE Iran, *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 13382.
- [16] Kadhum, S.A., 2020, A preliminary study of heavy metals pollution in the sandy dust storms and its human risk assessment from middle and south of Iraq, *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 8570.
- [17] Zheng, N., Liu, J., Wang, Q., Liang, Z., 2010, Health risk assessment of heavy metal exposure to street dust in the zinc smelting district, Northeast of China, *Science of the Total Environment*, 408, 726.
- [18] Sadeghdoust, F., Ghanavati, N., Nazarpour, A., Babaenejad, T., Watts, M.J., 2020, Hazard, ecological, and human health risk assessment of heavy metals in street dust in Dezful, Iran, *Arabian Journal of Geosciences*, 13, 881.

“Research article”

Investigation of heavy metal concentration, origin, and relationships in Sistan region dust: A novel approach with advanced statistical analysis

Seyed Mohammad Sadeq Tabib Loghmani¹, Mohammad Reza Rezaei Kahkha^{2*}, Ahmad Sharafati¹, Amin Reza Neshat³

¹Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

²Department of Environmental Health Engineering, Zabol University of Medical Sciences, Zabol, Iran

³Department of GIS/RS, Faculty of Natural Resources and Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

*Corresponding author: rezaei@zbmu.ac.ir

(Received: 18 September 2024, Accepted: 30 November 2024)

Abstract

This study investigates the concentrations and origins of heavy metals in dust from the Sistan region in southeastern Iran. Dust samples were collected over a year from 14 stations across urban, rural, industrial, and agricultural areas. The concentrations of 14 heavy metals were determined using atomic absorption spectrometry. The results indicated that manganese had the highest average concentration (463.01 mg/kg), while molybdenum had the lowest (1.79 mg/kg). Significant seasonal variations were observed, with the highest concentrations recorded in summer. Enrichment factors (EF) for arsenic, chromium, and vanadium were calculated as 2.8, 2.3, and 2.1, respectively, signifying moderate enrichment. The pollution index (PI) also reflected moderate pollution for these elements. Principal component analysis (PCA) revealed that the first two components accounted for 94.8% of the data variability. Relationships among elements showed that nonlinear models often provided better fits, with higher R² values (e.g., 0.81 for chromium) and lower mean squared errors (MSE). Analysis of variance (ANOVA) demonstrated significant monthly variations ($p < 0.001$) for 7 of the 14 elements. This comprehensive and innovative study enhances understanding of heavy metal contamination in the Sistan region's dust. Its findings can support the development of more effective pollution management strategies and contribute to protecting public health in the area.

Conflict of interest: None declared.

Keywords: Heavy metals, Dust, Sistan region, Contamination, Environment



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

دوره ۱، شماره ۳، پیاپی ۳
پاییز ۱۴۰۳، صفحات ۶۹-۶۳

"مقاله پژوهشی"

بررسی کارایی اکسید گرافن در جذب سطحی ۲-کلروفنل از محلول‌های آبی به عنوان یک آلاینده محیط زیست

پروین غربانی

دانشیار گروه شیمی، واحد اهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اهر، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: parvingharbani@yahoo.com
(دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۶/۲۸، پذیرش نهایی: ۱۴۰۳/۰۷/۲۲)

چکیده

در این مقاله، از اکسید گرافن برای حذف ۲-کلروفنل از محلول‌های آبی به روش جذب سطحی استفاده شد. به این منظور اثر پارامترهای مختلف از جمله غلظت اولیه ۲-کلروفنل، زمان تماس، pH اولیه محلول و مقدار جاذب بر روی حذف آن مطالعه شد. نتایج نشان داد که فرایند جذب سطحی در ۵۰ دقیقه به تعادل می‌رسد و مقدار حذف ۲-کلروفنل با افزایش مقدار جاذب ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. از طرفی با افزایش غلظت اولیه ۲-کلروفنل و pH، درصد حذف ۲-کلروفنل کاهش یافت. مطابق نتایج 0.3 g/L از اکسید گرافن قادر به حذف 78.76% از ۲-کلروفنل در غلظت اولیه 100 mg/L و در $\text{pH} = 2$ است. بنابراین اکسید گرافن جاذب پرقدرتی برای حذف ترکیب سمی ۲-کلروفنل از محیط‌های آبی می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: ۲-کلروفنل، جذب سطحی، اکسید گرافن، پارامترهای عملیاتی

مقدمه

توسعه تمدن و صنعتی شدن جوامع منجر به آلودگی آب می‌شود که تهدیدی جدی برای موجودات زنده محسوب می‌شود. فنل‌ها و مشتقات آن به طور گسترده در زندگی روزمره مورد استفاده قرار می‌گیرند (۱). کلروفنل‌ها به چنین دسته‌ای از آلاینده‌ها با منشأ آلی تعلق دارند (۲) که حاوی یک یا چند اتم کلر با پیوند کووالانسی هستند که می‌توان آن‌ها را به پنج گروه تقسیم کرد. مونو کلروفنل‌ها (۲-کلروفنل‌ها، ۳-کلروفنل‌ها، ۴-کلروفنل‌ها)، دی کلروفنل‌ها، تری کلروفنل‌ها، تتراکلروفنل‌ها و پنتاکلروفنل‌ها (۳). کلروفنل‌ها ترکیباتی هستند که در زندگی روزمره نقش دارند و در اکثر پساب‌های صنعتی به‌ویژه صنایع کاغذسازی و نساجی حضور دارند. کلروفنل‌ها به‌شدت بر سیستم عصبی و تنفسی انسان تأثیر می‌گذارند و خطرات جدی برای سلامتی انسان ایجاد می‌کنند (۴). این ترکیبات بسیار سمی هستند، بنابراین حذف آن‌ها از محیط‌های آبی بسیار حیاتی است. تاکنون از فرایندهایی مانند جداسازی با غشا (۵)، اسمز معکوس (۶)، تخریب فتوفتون (۷)، تخریب سونوشیمیایی (۸)، تخریب الکتروشیمیایی (۹)، انعقاد/لخته‌سازی (۱۰) و جذب سطحی (۱۱) برای حذف این ترکیبات استفاده شده است، اما جذب سطحی به‌عنوان یک فرایند سریع و ساده بسیار مورد توجه قرار گرفته است (۱۲). جاذب‌های مختلفی مانند کربن فعال (۱۳ و ۱۴)، زئولیت‌ها (۱۵)، خاک رس (۱۶ و ۱۷) و کیتوزان (۱۸ و ۱۹) برای حذف فنل و آلاینده‌های فنلی از فاضلاب مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

هدف از این تحقیق بررسی قابلیت جذب سطحی اکسید گرافن در حذف ۲-کلروفنل از محلول‌های آبی و بررسی اثر pH، مقدار جاذب، غلظت اولیه ۲-کلروفنل و زمان تماس در کارایی حذف ۲-کلروفنل است.

روش تحقیق

- مواد مورد استفاده

اکسید گرافن از نانوسان و ۲-کلروفنل، اتانول، هیدروکسید سدیم و اسیدکلریدریک از شرکت مرک خریداری شدند.

- روش بررسی کارایی اکسید گرافن در جذب سطحی ۲-کلروفنل

تمام آزمایش‌ها در یک ارلن مایر روی یک همزن مغناطیسی (Hanna HI 2210) انجام شد. به این ترتیب که محلول ۲-کلروفنل با غلظت‌های مورد نظر تهیه شده، مقدار معینی اکسید گرافن به محلول اضافه شد و محلول هم زده شد. در طول فرایند طی زمان‌های مشخص از محلول نمونه برداری انجام شده، نمونه‌ها فیلتر شده و جذب آن‌ها در $\lambda = 280 \text{ nm}$ با اسپکتروفوتومتر UV-Vis (Hach Co, DR5000) اندازه‌گیری شد. اثر پارامترهای pH، زمان تماس، مقدار اکسید گرافن و غلظت ۲-کلروفنل به روش ذکر شده مورد بررسی قرار گرفت. درصد حذف ۲-کلروفنل از طریق رابطه (۱) محاسبه شد (۳):

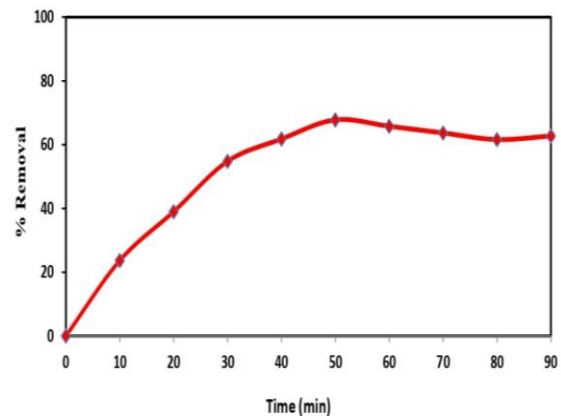
$$\text{Removal (\%)} = \frac{A_0 - A_t}{A_0} \times 100 \quad (1)$$

در این رابطه A_0 و A_t به ترتیب میزان جذب ۲-کلروفنل قبل و بعد از حذف بوده است.

نتایج و بحث

- بررسی تأثیر زمان تماس

برای بررسی مدت زمان تماس بر روی میزان حذف ۲-کلروفنل، محلولی با غلظت اولیه 100 mg/L از ۲-کلروفنل تهیه و 0.1 گرم اکسید گرافن به آن اضافه شد. سپس محلول با استفاده از همزن مغناطیسی به مدت ۹۰ دقیقه به هم زده شد. به منظور تعیین میزان حذف ۲-کلروفنل در زمان‌های مختلف و همچنین به دست آوردن زمان تماس بهینه، نمونه‌برداری در فواصل زمانی مختلف انجام شد که نتایج در شکل (۱) نشان داده شده است. مطابق شکل (۱) با افزایش زمان تماس، میزان حذف ۲-کلروفنل تا ۵۰ دقیقه اول، ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. در واقع بعد از ۵۰ دقیقه مکان‌های فعال اشباع شده و در نتیجه درصد حذف کاهش می‌یابد (۲۰). بنابراین سایر آزمایشات در مدت زمان تماس ۵۰ دقیقه بررسی شد.

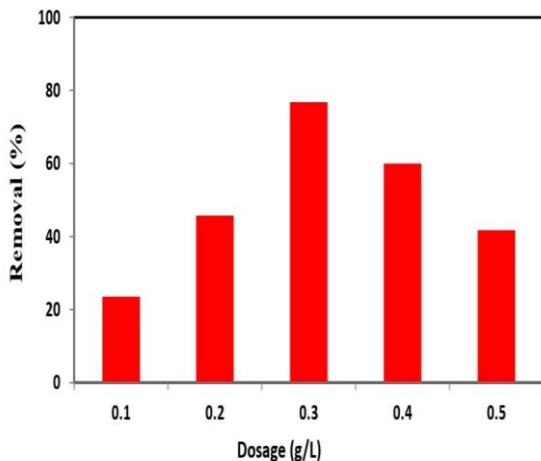


شکل (۱): بررسی تأثیر زمان تماس

(غلظت اولیه ۲-کلروفنل = 100 mg/L ، مقدار جاذب = g/L)(pH = ۶، 0.1)

- بررسی تأثیر مقدار اکسید گرافن

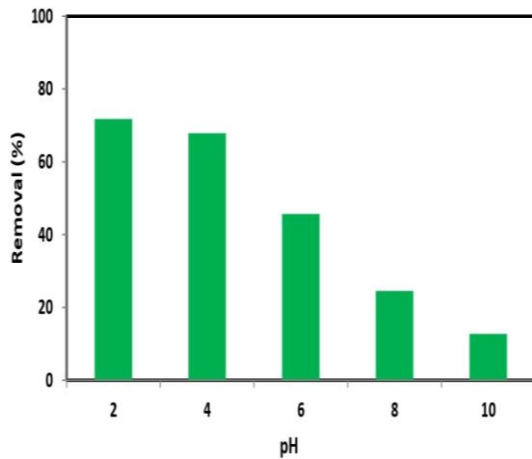
به منظور بررسی تأثیر مقدار اکسید گرافن بر حذف ۲-کلروفنل، تأثیر مقادیر مختلفی از اکسید گرافن مورد آزمایش قرار گرفت. شکل (۲) درصد حذف ۲-کلروفنل را بر حسب مقادیر مختلفی از اکسید گرافن نشان می‌دهد. نتایج شکل (۲) نشان می‌دهد که ابتدا با افزایش مقدار اکسید گرافن از 0.1 تا 0.3 g/L ، میزان حذف ۲-کلروفنل افزایش می‌یابد و سپس با افزایش آن تا 0.5 g/L کاهش می‌یابد. میزان افزایش اولیه حذف ۲-کلروفنل بر روی اکسید گرافن به این دلیل است که با افزایش مقدار جاذب، مساحت سطح ویژه بیش تری در دسترس بوده و باعث افزایش میزان جذب سطحی ۲-کلروفنل بر روی اکسید گرافن می‌شود. دلیل کاهش میزان حذف در مقادیر بیش تر از اکسید گرافن، مربوط به درگیر شدن اکسید گرافن در داخل محلول، کلوخه شدن آن و در نتیجه کاهش میزان حذف خواهد بود (۲۲ و ۲۱).



شکل (۲): بررسی تأثیر مقادیر مختلف از اکسید گرافن

(غلظت اولیه ۲-کلروفنل = 100 mg/L ، زمان تماس = 50 min)

(pH = ۶)



شکل (۳): بررسی تأثیر pH

(غلظت اولیه ۲-کلروفنل = ۱۰۰ mg/L، مقدار جاذب = ۵۰۰ mg/L، زمان تماس = ۵۰ min)

- بررسی تأثیر غلظت اولیه ۲-کلروفنل

برای بررسی اثر غلظت اولیه ۲-کلروفنل، ۵ محلول از آن به غلظت‌های ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰، ۵۰۰ mg/L تهیه شد. سپس محلول‌ها جداگانه به داخل ارلن مایر انتقال داده شده و ۰/۰۱ گرم اکسید گرافن به آن اضافه شد و فرایند جذب سطحی به مدت ۵۰ دقیقه روی همزن مغناطیسی انجام گرفت. بعد از نمونه‌برداری و فیلتراسیون، ابتدا نمونه‌ها رقیق شده و سپس جذب آنها توسط دستگاه اسپکتروفتومتر UV-Vis خوانده شده و درصد حذف محاسبه شد. شکل (۴) درصد حذف ۲-کلروفنل به وسیله اکسید گرافن را بر حسب غلظت‌های مختلف اولیه از ۲-کلروفنل نشان می‌دهد. مطابق شکل با افزایش غلظت اولیه ۲-کلروفنل، درصد حذف کاهش می‌یابد، بطوریکه در غلظت ۱۰۰ mg/L درصد حذف ۷۸/۷۶٪ می‌باشد که با افزایش غلظت تا ۵۰۰ mg/L درصد حذف به ۳۷/۶۵٪ کاهش می‌یابد. دلیل کاهش درصد حذف با افزایش غلظت اولیه ۲-کلروفنل این است که در لحظات اولیه جایگاه‌های جذب اشباع شده و در غلظت‌های بالاتر جایگاهی

- بررسی تأثیر pH

یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر روی فرایند جذب سطحی اثر pH است. جهت تعیین مناسب‌ترین pH، بعد از تهیه محلول ۱۰۰ mg/L از ۲-کلروفنل، pH محلول در محدوده ۲ تا ۱۰ تنظیم شد. بعد از تنظیم pH، ۰/۰۱ گرم اکسید گرافن به داخل محلول افزوده شده و واکنش به مدت ۵۰ دقیقه روی همزن مغناطیسی دنبال شد. بعد از نمونه‌برداری و فیلتراسیون، میزان حذف در هر لحظه محاسبه شد. شکل (۳) درصد حذف ۲-کلروفنل را بر حسب pH بر روی اکسید گرافن نشان می‌دهد. نکته قابل توجه در این شکل این است که با افزایش pH محلول، درصد جذب سطحی ۲-کلروفنل روی اکسید گرافن کاهش می‌یابد. در واقع، وقتی pH محلول کم‌تر از pK_a ۲-کلروفنل ($pK_a = 8/52$) باشد، ۲-کلروفنل عمدتاً به شکل مولکولی خود وجود خواهد داشت. در حالیکه با افزایش pH به بیش از pK_a ، تفکیک ۲-کلروفنل اتفاق افتاده و ۲-کلروفنل به فرم آنیونی در خواهد آمد. از طرفی pH_{zpc} اکسید گرافن در حدود ۲/۸ می‌باشد (۲۳)، یعنی اکسید گرافن در $pH < 2/8$ دارای بار سطحی مثبت و در $pH > 2/8$ دارای بار سطحی منفی و در $pH = 2/8$ بدون بار سطحی هست. لذا در $pH > 2/8$ چون هم جاذب و هم جذب شونده دارای بار منفی هستند با توجه به پدیده دافعه الکترواستاتیکی، با افزایش pH درصد حذف کاهش می‌یابد.

Sustainable Urban Development, 1(1), 33. (in Persian)

[2] Eskandarloo, H., 2024, A review of new methods of removing environmental pollutants: Photolysis and UV/H₂O₂ processes, Environmental Pollution and Sustainable Urban Development, 1(1), 1. (in Persian)

[3] Jankowska, K., Su, Z., Zdarta, J., Skiadas, I.V., Woodley, J.M., Pinelo, M., 2024, High performance removal of chlorophenols from an aqueous solution using an enzymatic membrane bioreactor, Environmental Pollution, 357, 124348.

[4] Ge, T., Han, J., Qi, Y., Gu, X., Ma, L., Zhang, C., Naeem, S., Huang, D., 2017, The toxic effects of chlorophenols and associated mechanisms in fish, Aquatic Toxicology, 184, 78.

[5] Zhang, W., Ding, L., Luo, J., Jaffrin, M.Y., Tang, B., 2016, Membrane fouling in photocatalytic membrane reactors (PMRs) for water and wastewater treatment: A critical review, Chemical Engineering Journal, 302, 446.

[6] Mohammad, A.T., Al-Obaidi, M.A., Hameed, E.M., Basheer, B.N., Mujtaba, I.M., 2020, Modelling the chlorophenol removal from wastewater via reverse osmosis process using a multilayer artificial neural network with genetic algorithm, Journal of Water Process Engineering, 33, 100993.

[7] Sharma, S., Mukhopadhyay, M., Murthy, Z.V.P., 2013, Treatment of chlorophenols from wastewaters by advanced oxidation processes, Separation & Purification Reviews, 42, 263.

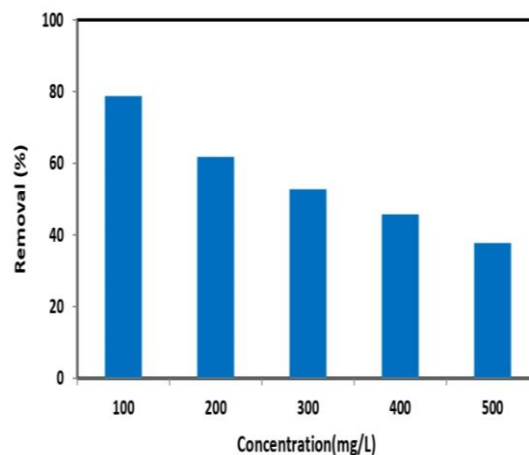
[8] Nagata, Y., Nakagawa, M., Okuno, H., Mizukoshi, Y., Yim, B., Maeda, Y., 2000, Sonochemical degradation of chlorophenols in water, Ultrasonics Sonochemistry, 7, 115.

[9] Zhao, Z., Zhang, J., Yao, J., You, S., 2022, Electrochemical removal of 4-chlorophenol in water using a porous Magnéli-phase (Ti₄O₇) electrode, Environmental Research, 210, 113004.

[10] Ganjidoust, H., Tatsumi, K., Wada, S., Kawase, M., 1996, Role of peroxidase and chitosan in removing chlorophenols from aqueous solution, Water Science and Technology, 34, 151.

[11] Abd Razak, N., Ainirazali, N., Abdullah, N., 2021, Removal of 2-chlorophenol using pomelo (Citrus Maxima) albedo as a new low

برای جذب سطحی بیش تر ۲-کلروفنل وجود نخواهد داشت (۱۷ و ۱۸).



شکل (۴): بررسی تاثیر غلظت اولیه ۲-کلروفنل

(مقدار جاذب = ۰/۱ g/L، زمان تماس = ۵۰ min، pH = ۶)

نتیجه گیری

در این کار تحقیقی، حذف ترکیب ۲-کلروفنل از محلول‌های آبی به روش جذب سطحی با استفاده از اکسید گرافن مورد بررسی قرار گرفت. اثر پارامترهای مؤثر غلظت اولیه ۲-کلروفنل، زمان تماس، pH آغازین و مقدار جاذب بر روی حذف ۲-کلروفنل مطالعه شد. نتایج نشان داد که حذف ۲-کلروفنل با افزایش مقدار جاذب ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌باید درحالی‌که افزایش غلظت اولیه ۲-کلروفنل و pH باعث کاهش در راندمان حذف ۲-کلروفنل شدند.

تعارض منافع

نویسنده هیچ‌گونه تعارض منافی برای اعلام ندارد.

منابع

[1] Zafari, S.H., 2024, Removal of p-nitrophenol from aqueous environments by UV/S₂O₈²⁻ process in a continuous photoreactor: Optimization by Taguchi method, Environmental Pollution and

- [20] Kurniawati, D., Sari, T.K., Adella, F., Sy, S., 2021, Effect of contact time adsorption of rhodamine B, methyl orange and methylene blue colours on langsat shell with batch methods, *Journal of Physics: Conference Series*, 1788, 012008.
- [21] Sharma, P., Kaur, H., 2011, Sugarcane bagasse for the removal of erythrosin B and methylene blue from aqueous waste, *Applied Water Science*, 1, 135.
- [22] Tazik, M., Dehghani, M.H., Yaghmaeian, K., Nazmara, S., Salari, M., Mahvi, A.H., Nasserri, S., Soleimani, H., Karri, R.R., 2023, 4-Chlorophenol adsorption from water solutions by activated carbon functionalized with amine groups: Response surface method and artificial neural networks, *Scientific Reports*, 13, 7831.
- [23] Mondal, N.K., Chakraborty, S., 2020, Adsorption of Cr (VI) from aqueous solution on graphene oxide (GO) prepared from graphite: Equilibrium, kinetic and thermodynamic studies, *Applied Water Science*, 10, 61.
- cost adsorbent, *Materials Today: Proceedings*, 41, 43.
- [12] Garba, Z.N., Zhou, W., Lawan, I., Xiao, W., Zhang, M., Wang, L., Chen, L., Yuan, Z., 2019, An overview of chlorophenols as contaminants and their removal from wastewater by adsorption: A review, *Journal of Environmental Management*, 241, 59.
- [13] Ioannou, Z., Simitzis, J., 2009, Adsorption kinetics of phenol and 3-nitrophenol from aqueous solutions on conventional and novel carbons, *Journal of Hazardous Materials*, 171, 954.
- [14] Tseng, R.L., Wu, K.T., Wu, F.C., Juang, R.S., 2010, Kinetic studies on the adsorption of phenol, 4-chlorophenol, and 2,4-dichlorophenol from water using activated carbons, *Journal of Environmental Management*, 91, 2208.
- [15] Damjanović, L., Rakić, V., Rac, V., Stošić, D., Auroux, A., 2010, The investigation of phenol removal from aqueous solutions by zeolites as solid adsorbents, *Journal of Hazardous Materials*, 184, 477.
- [16] Froehner, S., Martins, R.F., Furukawa, W., Errera, M.R., 2009, Water remediation by adsorption of phenol onto hydrophobic modified clay, *Water, Air, and Soil Pollution*, 199, 107.
- [17] Zhou, S., Zhang, C., Hu, X., Wang, Y., Xu, R., Xia, C., Zhang, H., Song, Z., 2014, Catalytic wet peroxide oxidation of 4-chlorophenol over Al-Fe-, Al-Cu-, and Al-Fe-Cu-pillared clays: Sensitivity, kinetics and mechanism, *Applied Clay Science*, 95, 275.
- [18] Zhou, L.C., Meng, X.G., Fu, J.W., Yang, Y.C., Yang, P., Mi, C., 2014, Highly efficient adsorption of chlorophenols onto chemically modified chitosan, *Applied Surface Science*, 292, 735.
- [19] Zhou, L.C., Meng, X.G., Li, J.M., Hu, W., Liu, B., Du, J., 2012, Kinetics and thermodynamics of adsorption of chlorophenols onto β -cyclodextrin modified chitosan, *Acta Physico-Chimica Sinica*, 28, 1615.

“Research article”

Investigating the efficiency of graphene oxide in the adsorption of 2-chlorophenol from aqueous solutions as an environmental pollutant

Parvin Gharbani*

Department of Chemistry, Ahar Branch, Islamic Azad University, Ahar, Iran

*Corresponding author: parvingharbani@yahoo.com

(Received: 18 September 2024, Accepted: 13 October 2024)

Abstract

The purpose of the present research was to evaluate the potential of graphene oxide as an adsorbent for removing 2-chlorophenol (2-CP) from aqueous solutions. For this purpose, the effects of various parameters, including the initial concentration of 2-CP, contact time, initial pH, and adsorbent dosage, were examined. The results showed that 2-CP adsorption reaches equilibrium within 50 min. An increase in 2-CP concentration and pH leads to a decrease in 2-CP removal efficiency. Additionally, increasing the adsorbent dosage initially enhanced the removal percentage of 2-CP, but further increases led to a decrease. Based on the findings, 0.3 g/L of graphene oxide can remove 78.76% of 2-CP at an initial concentration of 100 mg/L and pH of 2. Thus, graphene oxide is an effective adsorbent for removing 2-CP as a toxic compound from aqueous solutions.

Conflict of interest: None declared.

Keywords: 2-Chlorophenol, Adsorption, Graphene oxide, Operational parameters



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

دوره ۱، شماره ۳، پیاپی ۳
پاییز ۱۴۰۳، صفحات ۸۷-۷۱

"مقاله پژوهشی"

بررسی میزان رضایت بیماران از مولفه‌های موثر بر مطلوبیت فضای سبز (مطالعه موردی: بیمارستان‌های امام رضا و بیستون کرمانشاه)

سحر طوفان^۱، بهنام شیرویه‌زاد^{۲*}

۱. دانشیار گروه معماری، دانشکده معماری و هنر، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

۲. دانشجوی دکتری گروه معماری، واحد ارس، دانشگاه آزاد اسلامی، جلفا، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: behnamshiro95@gmail.com

(دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۳/۰۹، پذیرش نهایی: ۱۴۰۳/۰۷/۰۴)

چکیده

طراحی فضاهای درمانی بسیار حائز اهمیت است، سپری کردن زمان‌های طولانی در محیط‌های درمانی معمولاً برای کارکنان، ملاقات‌کنندگان، همراهان بیمار و بیمار تجربه‌ای ناخوشایند و بسیار استرس‌زا است. در پژوهش حاضر میزان رضایت بیماران دو مرکز درمانی امام رضا و بیستون کرمانشاه از مؤلفه‌های موثر بر مطلوبیت فضای سبز مورد بررسی قرار گرفت. این پژوهش توصیفی - تحلیلی است. مؤلفه‌های فضای سبز شناسایی و از بررسی متون، مطالعات مرتبط و نظرات متخصصین در قالب پرسشنامه محقق ساخته و با تأیید متخصصین مربوطه به صورت قالب مقیاس لیکرت (پنج گزینه‌ای) طراحی و توسط ۱۵۰ نفر از بیماران بیمارستان امام رضا و ۱۵۰ نفر از بیماران بیمارستان بیستون انتخاب شدند که در مجموع ۳۰۰ پرسشنامه تکمیل گردید. تحلیل‌های آماری با استفاده از نرم‌افزار SPSS انجام شد و در راستای توصیف مؤلفه‌های پژوهش از آمار توصیفی (میانگین، انحراف معیار، واریانس) استفاده شد. در بخش آمار استنباطی از ضریب همبستگی برای بررسی ارتباط بین مساحت فضای سبز و میزان رضایت بیماران از مرکز درمانی، از آزمون تی مستقل برای مقایسه میزان رضایت بیماران دو بیمارستان مذکور، و از آزمون فریدمن جهت شناسایی مؤلفه‌های رضایتمندی بیماران استفاده شد. نتایج حاکی از آن است که احساس رضایت در مرکز درمانی بیستون نسبت به مرکز درمانی امام رضا بالاتر است و از میان ۱۳ مؤلفه مؤثر در رضایت بیماران دو مرکز درمانی، مساحت فضای سبز بیشترین امتیاز دیده شدن و عناصر طبیعی مانند آب‌نما و فواره کم‌ترین امتیاز را داشتند. به عبارت دیگر با افزایش مساحت فضای سبز، میزان رضایتمندی بیماران از مرکز درمانی نیز افزایش پیدا می‌کند.

واژه‌های کلیدی: بیمارستان، رضایت بیمار، فضای سبز، بیمارستان امام رضا، بیمارستان بیستون

مقدمه

مطالعات نشان داده است که حضور در مراکز درمانی تجربه‌ای پر استرس می‌باشد. کاربران مراکز درمانی به واسطه حضور در این مکان پرتنش دچار اضطراب و ناآرامی هستند، همچنین سلامت روحی و روانی کارکنان درمانی در عملکرد آنان در محیط کار بسیار مهم بوده و در سطح خدمت‌رسانی به بیماران و سیستم درمانی نقش اصلی را ایفا می‌کند. از مؤلفه‌های موثر بر معماری و طبیعت سبز در فضای عمومی بیمارستان‌ها، در کاهش استرس بیماران می‌توان بهره برد (۱). در بین فضاهای معماری، طراحی هیچ فضایی مانند مراکز درمانی از اهمیت بالایی برخوردار نمی‌باشد. امروزه در طراحی بیمارستان، عملکردگرایی بخش عمده‌ای از تفکر طراحی را به خود اختصاص می‌دهد، به نحوی که توجه به کیفیات محیطی و تاثیرات چشمگیر آن بر روند درمان بیماران، و کاهش اضطراب در آن‌ها نقش کمتری را ایفا می‌کند. متأسفانه امروزه محیط طبیعی را به صورت انوعی از ساختارها می‌بینیم که اشتراک زیادی با روح آدمی ندارند. با توجه به تجربه انسان‌ها در گذشته، هرگاه از ابزاری برای غلبه بر طبیعت استفاده شده، آن ابزار بر ضد خود او سر برافراشته است. بهترین نمونه آن استفاده از ابزار صنعتی جهت حفاظت انسان از مخاطرات طبیعی و مکانیزه‌تر کردن زندگی مدرن است که همین ابزار به گونه‌ای در حال تخریب زندگی انسان از طریق آلودگی‌های فراگیر صوتی، بصری و زیست محیطی است (۲). امروزه جهت رفع این مشکل بازگشت به طبیعت و همراه شدن با آن امری اجتناب‌ناپذیر است. از گذشته تا کنون معماری به عنوان ابزاری مناسب جهت زندگی در میان طبیعت بوده و هست (۳).

امروزه فضاهای درمانی و بیمارستان‌ها در نگهداری و احیاء سلامت جسمانی و روانی افراد یک جامعه و ایجاد تناسب و تعادل جسمی و روحی نقش بسیار زیاد و حساسی را دارا می‌باشند. لذا استفاده از ظرافت‌های خاصی در طراحی این گونه مراکز الزامی می‌باشد. یکی از راه‌های موثر در بهبود بیماران استفاده از سبزی‌نگی در طراحی این مراکز می‌باشد (۳). مراکز درمانی به عنوان مکانی که فرایند مراقبت و درمان افراد بیمار (که بخشی از جسم یا روان او آسیب دیده) در آن انجام می‌گیرد از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. متأسفانه طراحی این گونه مراکز در کشور ما و در سایر نقاط جهان نه تنها تاثیری بر روند بهبود بیمار ندارد بلکه باعث استرس و تنش در بیمار و افراد حاضر داخل مجموعه می‌شود (۴). یکی از راهکارهای مهمی که در دهه‌های گذشته، در راستای ارتقاء کیفیت محیط مراکز درمانی بکار رفته است؛ ایجاد ارتباط بین افراد حاضر در مراکز درمانی با طبیعت می‌باشد (۵). فضای سبز در محیط‌های درمانی از جمله اساسی‌ترین عوامل طراحی به شمار می‌رود و سلامت انسان با آن ارتباطی مستقیم دارد. لذا باید به نیاز انسان به فضای سبز در محیط‌های درمانی به عنوان مهمترین عامل اکوسیستم، توجه ویژه‌ای داشت، چرا که نقش گیاهان به ویژه درختان، در پالایش و کاستن آلودگی‌های گوناگون هوا، صدا، نور و ... و زیباسازی محیط زیست بسیار قابل توجه است که منجر به کاهش استرس بیماران، پرسنل و ملاقات‌کنندگان، افزایش آستانه تحمل درد و کاهش استفاده از داروهای مسکن، کاهش افسردگی بیماران، زندگی با کیفیت بالاتر برای بیماران دائمی، کاهش هزینه‌ها، کاهش مدت زمان بهبود، افزایش

مبانی نظری

آنچه که برای ما بسیار حائز اهمیت است، تغییر شیوه طراحی معماران امروزی در محیط درمانی است و بالاخص استفاده بیشتری از مساحت مجموعه برای سبزی‌نگی. فضای سبزی که در محیط درمانی بکار می‌رود نه تنها محل مناسبی برای سپری کردن اوقات فراغت بیماران بشمار می‌آید بلکه از نظر آسایش روانی بر روی روح و جسم پرسنل و علل الخصوص بیمار نیز تاثیر می‌گذارد. بر اساس مطالعات انجام شده بسیاری از بیماران در زمان‌های استرس‌زا بیشترین استفاده را از فضای سبز می‌کنند، فضای سبز آثار مثبت روحی و روانی بر انسان‌ها دارد (۹). چه بسا بهتر است طبق همین نظریه فضای سبز را به داخل محیط درمانی بیاوریم و بتوانیم از پیامدهای مثبت آن استفاده بهینه ببریم. عملکرد فضاها‌ی سبز بطور کلی سه دسته‌اند:

- ۱- عملکرد زیست محیطی فضای سبز، ۲- عملکرد فضای سبز در ساخت کالبدی شهر، ۳- عملکرد اجتماعی-روانی. فضای سبز علاوه بر کارکردهای فوق می‌تواند به آرامش، جوان‌سازی و کاهش خشونت مردم کمک کند (۱۰).

طاهری نیز اذعان دارد که "نمی‌توان بدون انسانی با اندیشه و سبک زندگی سبز، از محیط و معماری پایدار و سبز سخن گفت. چرا که سیطرهٔ گفتمان مهندسی و تکنولوژی بر گفتمان علوم انسانی، حیات طبیعی جسم و روان یا ابعاد انسانی در نظر و عمل را، به بهای آسایش فیزیکی انسان، به کناری نهاده است". اصطلاح فضای سبز، برای مفهوم پوشش گیاهی به کار گرفته شده است (۱۱). مطالعات پیشین نشان دهنده این هستند که زندگی در طبیعت می‌تواند مشکلات قلبی را کاهش دهد. از همین رو استفاده از فضای سبز

رضایتمندی بیمار، افزایش رضایتمندی شغلی در پرسنل می‌شود. به عبارت دیگر فضای سبز باعث تامین آسایش، آرامش، امنیت روحی و ایجاد انگیزه در استفاده‌کنندگان خواهد شد (۶). بیمارستان‌ها اغلب به دلیل جنبه‌های کمبود امنیت، کمبود کنترل خوردن و زمان خواب، کمبود اطلاعات و مشکلات یافتن مسیر در ساختمان‌های ناآشنا و پیچیده، کنترل احساسات را تحلیل می‌برد (۷). این جنبه‌ها سبب استرس در بیماران بالغ می‌شوند که منجر به اثرات منفی بسیاری از قبیل افسردگی، اضطراب، ناتوانی، کاهش عملکرد ادراک، افزایش فشارخون، سطوح بالاتر هورمون‌های استرس و سرکوب عملکرد ایمنی بدن می‌شوند (۸).

روش تحقیق

پژوهش حاضر به دنبال پاسخگویی به سؤال زیر است:

- میزان حس رضایت بیماران مراکز درمانی امام رضا و بیستون کرمانشاه از مؤلفه‌های مطلوبیت فضای سبز چگونه است؟

فرضیات پژوهش شامل موارد زیر است:

- به نظر می‌رسد مؤلفه‌های مؤثر متعددی بر مطلوبیت فضای سبز در مراکز درمانی وجود دارد.

- به نظر می‌رسد میزان رضایتمندی بیماران مرکز درمانی بیستون از مؤلفه‌های مؤثر بر مطلوبیت فضای سبز نسبت به مرکز درمانی امام رضا بیش‌تر است.

اهداف پژوهش شامل موارد زیر است:

- تعیین میزان تاثیر مؤلفه‌های مؤثر بر مطلوبیت فضای سبز مراکز درمانی

- مقایسه میزان رضایتمندی بیماران مراکز درمانی از مؤلفه‌های مؤثر بر مطلوبیت فضای سبز در مراکز درمانی بیستون و امام رضا

می‌تواند در بخش بیماران قلبی بیش‌تر از هر بخش دیگری استفاده شود و باعث کاهش استرس شود پس چه بهتر است که با الهام گرفتن از طبیعت، سبزینگی را به داخل محیط درمانی بیاوریم، سبزینگی در مجموعه درمانی و الهام گرفتن از طبیعت باعث بوجود آمدن جان و رونق بسیاری در آن فضا می‌شود. مسائلی که امروزه ما معماران به آنها می‌اندیشیم و فضاهایی که طراحی می‌کنیم، در روحیات و آسایش افراد تاثیر خواهد داشت و رفتار و نحوه برخورد با افراد دیگری را که در این فضاها سر و کار دارند را شکل می‌دهد (۱۲).

- ارتباط انسان با طبیعت

ارتباط با طبیعت موجب کاهش فشار عصبی و بهبود سلامت روحی و جسمی بیماران و مربیان می‌شود. وجود مسیرهای سخت در محیط و راه‌هایی که دارای نوعی ابهام باشند و حس کنجکاوی را در بیماران برمی‌انگیزند، بسیار شادی‌بخش هستند. زیرا موجب بالا رفتن تحرک و حس یاد گرفتن و یافتن می‌شود. همچنین کسانی که در محیط درمانی از کار زیاد، بیماری یا تشویش دچار استرس می‌شوند به فضای سبزی نیاز دارند که به خاطر محیط آشنای آن، تسکین دهنده است (۱۳). از دیگر اثرات فضای سبز کاهش تعداد روز بستری شدن در بیمارستان است، شاید بهترین مدرک مستند از اثرات محیط طبیعی بر بیماران جراحی و دستیابی آنها به جهان بیرون پژوهش روجر اولریش در سال ۱۹۸۴ باشد، این مطالعه نشان داد که ارتباطی بین دوره بستری، استفاده از داروهای مسکن و توانایی مشاهده طبیعت از طریق پنجره بیمارستان وجود دارد. بر اساس یافته‌های مطالعات، بیمارانی که دسترسی به نمای طبیعت

داشتند، سریع‌تر بهبود یافتند و نیاز به داروی مسکن کم‌تری داشتند (۱۴). مشاهده مجموعه‌های حاوی گیاهان یا طبیعت برای چند دقیقه (سه تا پنج دقیقه) می‌تواند بازسازی قابل توجهی در بهبودی بیماران داشته باشد حتی اگر به شدت استرس داشته باشند (۱۵). نمای طبیعت یا اشکال باغچه مانند، سطوح احساسات مثبت (خشنودی و آرامش) را افزایش می‌دهد و عواطفی همچون ترس، خشم و ناراحتی را کاهش می‌دهد. تحقیقات درمانی دریافته‌اند که نماهای طبیعت در کم‌تر از پنج دقیقه بازسازی معنی‌داری را با تغییرات مثبت از قبیل فشار خون، فعالیت قلب، گرفتگی عضلات و فعالیت الکتریکی مغز ایجاد می‌کنند (۱۶).

- تاثیر گیاهان بر انسان

در بررسی چرایی تأثیر طبیعت بر انسان از منظر علم، دو نظر کلی بدست می‌آید. اولریش معتقد است "ارتباط با طبیعت؛ با کاهش استرس، به بدن کمک می‌کند که در وضعیت تعادل قرار گیرد" و دلایل این کاهش استرس را اینگونه عنوان می‌کند: تفاوت مقیاس داخلی ساختمان و فضای سبز در خارج از ساختمان، تجربه اشکال طبیعی در مقابل خطوط مستقیم داخل ساختمان، مکانی برای تنهایی و خلوت گزیدن در مقابل فضای غیرخصوصی داخل ساختمان، هوای تازه طبیعت در مقابل هوای کنترل شده (۱۷).

ویلسون نیز در نظریه بیوفیلیا اینگونه استدلال می‌کند که چون انسان‌ها از طبیعت برخوردارند؛ ذاتاً با طبیعت ارتباط درونی دارند و در جستجو و پیشروی به سمت محیط طبیعی یا محیط‌هایی که تقلیدگر محیط‌های جهان طبیعی است، تلاش می‌کنند (۱۸). از نظر روانشناسی سبزینگی و تاثیر فضای سبز خوب

نیازهای انسان را برآورده، خاطر او را آسوده ساخته و احساس آسایش و امنیت ایجاد کرده و با پس زمینه فضا تناسب یافته و به بافت، رنگ و شکل (فرم) اثاثیه جلوه‌ای زیبا می‌دهد. برخلاف این حالت، سبزینگی نادرست می‌تواند محل را آکنده از جوی ناراحت کننده یا ساکنان آن محل را عصبی، نگران و مضطرب سازد. نور کم و حساب نشده باعث سردرد، خستگی چشم، اضطراب می‌شود. سبزینگی محیط درمانی، باید امن باشد طوریکه بیماران احساس نکنند که به اصطلاح در تنگ ماهی قرار دارند و دیگران به آن‌ها خیره شده‌اند. آرامش در محیط باید در حدی باشد که وقتی بیماران یا پرسنل برای استراحت به فضای سبز خارج می‌روند بتوانند در آرامش کامل چشم‌ها را ببندند یا در آفتاب دراز کشیده و چرتی بزنند، یا بتوانند در آفتاب یا سایه بنشینند (۱۹).

رویارویی با سبزینگی نشان می‌دهد که تماشای مناظر طبیعی فشار روانی را کاهش می‌دهد، احساسات و حالات خلقی مثبت را برمی‌انگیزد و می‌تواند بهبودی از بیماری را سرعت بخشد (۲۰). در واقع اگر فرد بیمار در محیط نامناسب باشد و از آن محیط ناراضی بوده و احساس خوشایندی نداشته باشد آن فرد دچار اضطراب خواهد شد، این عوامل می‌توانند بر روح و جسم بیمار و آرامش و سلامت آن تاثیر بگذارند (۲۱). از طرفی پژوهشگران بسیار نشان داده‌اند که رضایت از زندگی یکی از پیش‌بینی‌کننده‌های سلامت روانی است. رضایت از زندگی از سایر سازه‌های روان شناختی مانند عاطفه مثبت و منفی، عزت نفس و خوش‌بینی متمایز است (۲۲). در واقع دیدگاه

امیدوارانه و خوش‌بینانه موجب فراخوانی هیجان‌های مثبت می‌شود و کیفیت مقابله با منابع استرس را بهبود می‌بخشد. هرچه میزان رضایت از زندگی بالاتر باشد فرد مستعد تجربه عواطف و احساسات مثبت است (۲۳). یافته‌های پژوهش دیگری نشان داد محیطی که بیمار در آن بستری است، بر میزان کیفیت زندگی وی تأثیر بسیار زیادی دارد، با افزایش میزان رضایت از اتاق بستری به دلیل وجود سبزینگی و گیاهان مصنوعی، همچنین ارتباط با بیرون یعنی وجود عناصر گیاهی حتی در خارج از اتاق‌های بستری، کیفیت زندگی در بیماران افزایش یافته و بیماران، بیش‌تر ترجیح می‌دهند فضای سبز در نزدیکی اتاق بستریشان باشد، زیرا که باعث بهبود روحیه، کاهش اضطراب، استرس، تنش و افسردگی خواهد شد و وجود گیاهان در داخل ساختمان تحمل درد را افزایش می‌دهد (۲۴). در همین راستا در اتاق عمل، اتاق‌های بستری و راهروهایی که متراژ بسیار کمی دارند و استفاده از سبزینگی و طراحی فضای سبز داخل آن تا حدودی مشکل است می‌توان تصاویری از آثار هنری طبیعی را استفاده کرد تا موجب حواس‌پرتی‌های مثبت، تولید احساس مثبت، ارتقای توجه و علاقه پایدار و کاهش افکار نگران‌کننده و اضطراب بعد از عمل شود (۲۵).

پیشینه پژوهش

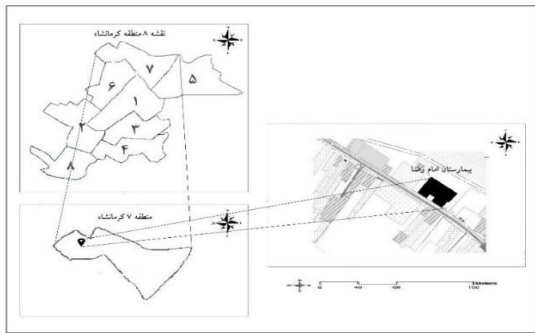
در جدول (۱) مقالات و پایان‌نامه‌های داخلی و خارجی که بر اساس عنوان اثر و نتیجه‌گیری از کلیات مقاله بر اساس دیدگاه نگارندگان اتخاذ شده تهیه و گزارش شده است.

جدول (۱): پیشینه پژوهش داخلی و خارجی

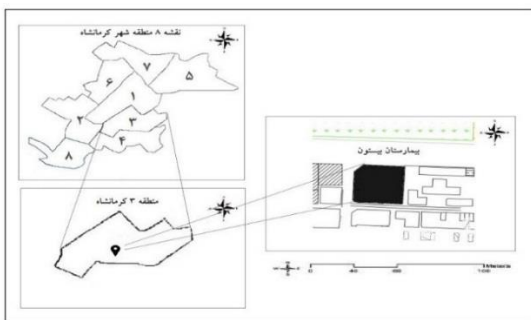
ردیف	سال	منبع	عنوان اثر	نتیجه
۱	۱۴۰۱	(۱۶)	دسترسی به معیارهای محیط شفابخش بیمارستانی با رویکرد بیمار-محوری	هدف پژوهش حاضر بهبود کیفیت فضا، ارتقای رضایت بیماران و تسریع روند بهبودی می‌باشد. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که با در نظر گرفتن نیازهای بیماران، می‌توان با ارائه راهکارهایی برای طراحی بیمارستان محیطی مطلوب‌تر برای بیماران و پرسنل ایجاد کرد.
۲	۱۳۹۵	(۱۷)	تحلیل و شناخت تأثیر طراحی داخلی بیمارستان بر بهبود عملکرد بیماران بستری در بخش‌های روان‌پزشکی	افته‌های پرسش‌نامه بیماران با نتایج به دست آمده از پرسش‌نامه کادر پزشکی به عنوان گروه خبره و معیار جواب‌ها مقایسه شد. یافته‌های مطالعه نشان داد که شرکت کنندگان نسبت به حضور نور طبیعی در بخش بستری رضایت بیشتری داشتند و آن را عامل مؤثرتری نسبت به نور مصنوعی در بهبود عملکرد بیماری دانستند. وجود عناصر سبز مانند گل و گیاه و محیط‌های درمانی بر بهبود عملکرد بیماران بستری در بخش‌های روان‌پزشکی بر سلامت بیمار بود. عامل دیگر، حفظ حریم شخصی بیمار در عین حفظ امنیت او بود که با استفاده از اتاق‌هایی با یک تخت، نظارت نامحسوس پرستار بر اتاق‌ها، عدم نصب نرده و توری پشت پنجره‌ها و امکان حرکت آزادانه بیمار در بخش بستری محقق می‌گردد. وجود فضایی جهت نشیمن و تماشای تلویزیون و اتاق ناهارخوری در بخش بستری نیز اثر مثبتی بر بهبود عملکرد بیمار داشت. نتیجه‌گیری: دسترسی به نور طبیعی، استفاده از رنگ‌های سرد و ملایم، تزیینات داخلی، حضور عناصر طبیعی و بهره‌مندی از آن‌ها و همچنین، رعایت حریم شخصی بیمار در کنار حفظ امنیت او، از جمله عوامل مهم در طراحی داخلی محیط بستری بیمارستان‌های روان‌پزشکی به شمار می‌رود که باید به آن‌ها در طراحی بیمارستان‌های روان‌پزشکی توجه ویژه‌ای نمود.
۳	۱۴۰۰	(۱۸)	درمانی، مورد مطالعاتی: بیمارستان شهید رحیمی و شهدای عشایر خرم‌آباد	در این پژوهش نویسندگان به دنبال اهمیت بالای جسم و روح انسان و بررسی تأثیر نور و رنگ در طراحی فضاهای تأثیر رنگ و نور بر روی آن و شناخت و چگونگی به کارگیری این دو عامل در بهبودی بیماران می‌باشد. نتایج به دست آمده در این پژوهش به این نکته اشاره دارد که با توجه به نیاز و خواست بیمار در فضاهای درمانی می‌بایست از رنگ و نور مناسب برای هر فضایی و عوامل زیباسازی متناسب با آن فضا، محیط ملتهب بیمارستان را به محیطی شاد و آرامش بخش تبدیل کرد.
۴	۱۴۰۰	(۱۹)	طراحی معماری بیمارستان با رویکرد بیمارمحور: شناسایی عوامل مؤثر بر تجربه ارائه یک درمان موفق و خوب همراه با تعاملات انسانی درون بیمارستان زیسته بیمار از حس مکان در فضای درمانی بین بیمار و کاربران و همراهان در یک بیمارستان کامل با فضای کارآمد از طریق ویژگی‌های ثابت محیط و یک محیط شفابخش با کمک ویژگی‌های متغیر محیط و نیز قرارگیری بیمارستان در یک موقعیت مناسب در شهر، قابلیت دسترسی و شناسایی آسان آن، در ایجاد یک حس کلی بیمار نسبت به بیمارستان، موثر می‌باشد.	در این پژوهش نویسندگان به دنبال بررسی درک بیماران از عوامل موثر بر طراحی معماری بیمارستان با رویکرد حس مکان در فضای بیمارستانی از اجزاء بیمارستان می‌باشد. در نتیجه شناسایی عوامل مؤثر بر تجربه ارائه یک درمان موفق و خوب همراه با تعاملات انسانی درون بیمارستان زیسته بیمار از حس مکان در فضای درمانی بین بیمار و کاربران و همراهان در یک بیمارستان کامل با فضای کارآمد از طریق ویژگی‌های ثابت محیط و یک محیط شفابخش با کمک ویژگی‌های متغیر محیط و نیز قرارگیری بیمارستان در یک موقعیت مناسب در شهر، قابلیت دسترسی و شناسایی آسان آن، در ایجاد یک حس کلی بیمار نسبت به بیمارستان، موثر می‌باشد.

ادامه جدول (۱):

۵	۱۳۹۶	(۲۰)	بررسی مطالعه تعیین میزان رضایتمندی بیماران از طرح تحول سلامت در بیمارستان امام رضا (ع) کرمانشاه	هدف این تحقیق بررسی مطالعه تعیین میزان رضایتمندی بیماران از طرح تحول سلامت در بیمارستان امام رضا (ع) کرمانشاه می‌باشد. نتایج حاصله از این طرح تحول سلامت در بیمارستان امام رضا (ع) کرمانشاه پیشنهادها، کاربردی پرداخت کارانه و سختی کار مناسب، ایجاد استانداردهای شغلی مناسب جهت کاهش استرس شغلی و افزایش راندمان کاری، اعمال سیستم‌های تشویق و تنبیه مناسب، ایجاد تسهیلات و امکانات رفاهی و ورزشی برای کارکنان از جمله پزشکان و پرستاران سبب بهبود رضایت شغلی آنان خواهد شد و در نهایت منجر به ارتقاء هرچه بیشتر خدمات مراقبت از بیماران در طرح نظام سلامت خواهد شد.
۶	۱۳۹۶	(۲۱)	مطالعه نقش فضاهای سبز بیمارستانی در راستای بازیابی روحی بیماران (مطالعه موردی: بیمارستان‌های شهر تبریز)	هدف این پژوهش، ارزیابی شیوه‌های صحیح طراحی محوطه‌های بیمارستانی به منظور معرفی بهترین شیوه‌های منظرسازی و ارائه دستورالعمل و راه‌کار برای طراحی‌های آینده می‌باشد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که طراحی محوطه‌های بیمارستانی باید با مدنظر داشتن نیاز سبز گروه بیمار، کادر و سایر مراجع کنندگان انجام گیرد.
۷	۱۳۹۶	(۲۲)	بررسی کیفیت معماری فضاهای داخلی بیمارستان‌ها از دیدگاه ادراکی بیماران و کارمندان (مطالعه موردی: بیمارستان شمس تبریز)	هدف از این پژوهش، مقایسه ادراک کاربران بیمارستان از کیفیت معماری داخلی برای ارتقای وضع موجود فضاهای درمانی و طراحی مناسب‌تر بیمارستان‌های آینده است. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که بر اساس آزمون ناپارامتری یومان-ویتنی، ادراک بیماران و کارکنان از معیارهای معماری داخلی شامل حریم شخصی، دما، آلودگی صوتی، تهویه، نور طبیعی و نور مصنوعی دارای تفاوت معنادار است. در نتیجه ارائه تفاوت‌ها و شباهت‌های نیازهای بیماران و کارکنان از کیفیت معماری داخلی می‌تواند به معماران و طراحان در زمینه اصلاح وضع موجود و ارتقای کیفیت طراحی‌های آتی کمک کند.
۸	۱۳۹۵	(۲۳)	بررسی تاثیر معماری داخلی در محیط‌های درمانی بر روند بهبودی از دیدگاه بیماران (مطالعه موردی: بیمارستان شهدا و پیامبر اعظم گنبدکاووس)	هدف از این پژوهش، بررسی تاثیر معماری داخلی در محیط‌های درمانی و تاثیر آن بر روند بهبودی و رضایت بیماران می‌باشد. به این منظور برای دستیابی به عوامل تاثیرگذار بر روند بهبودی بیماران، دو فعالیت به موازات یکدیگر انجام شد. نتیجه نشان می‌دهد که عوامل کالبدی نظیر نور، رنگ، چیدمان و مبلمان، فضای سبز و ... بر وضعیت بیماران از محیط تاثیر گذاشته و در نتیجه باعث تسریع روند بهبودی و افزایش سطح رضایت بیماران از بیمارستان می‌شود.
۹	۲۰۱۸	(۲۴)	عوامل موثر بر رضایت بیماران در سطوح مختلف امکانات بهداشتی	هدف نویسندگان اندازه‌گیری سطح رضایت بیماران از سطوح مختلف امکانات بیمارستان و طراحی آن می‌باشد. در نتیجه بخش قابل توجهی از بیماران از فضای بیمارستان و طراحی بیمارستان راضی نبودند، همچنین رضایت بیماران را می‌توان با تمرکز بر بهبود طراحی فضا، بهبود امکانات افزایش داد.
۱۰	۲۰۱۸	(۲۵)	بررسی سیستماتیک دسترسی به فضاهای سبز در مراکز بهداشتی و درمانی	این مقاله تجربیات کاربران (کارکنان، بیماران و بازدیدکنندگان) را که به فضاهای سبز در یک محیط بهداشتی شهری دسترسی داشته‌اند، تشریح می‌کند. نتایج نشان می‌دهد می‌توان با نظریه‌های تعامل انسان و طبیعت فضای مناسبی برای بیماران بوجود بیاوریم که باعث خشنودی بیمار از محیط درمانی و رضایت کارکنان باشد.



شکل (۱): موقعیت بیمارستان امام رضا در نقشه ۸ گانه شهر کرمانشاه



شکل (۲): موقعیت بیمارستان بیستون در نقشه ۸ گانه شهر کرمانشاه

محدوده مورد مطالعه

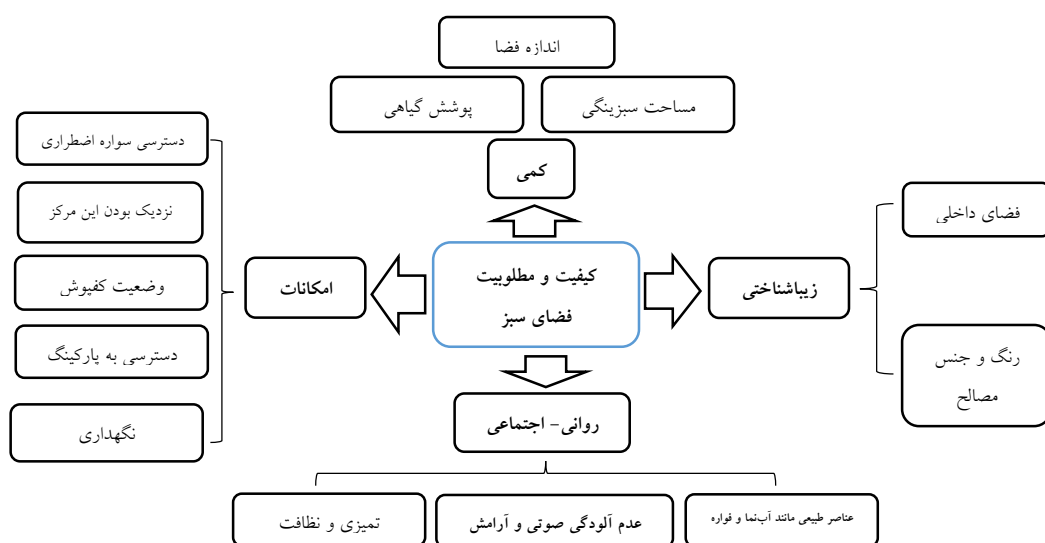
شهرستان کرمانشاه، مرکز استان کرمانشاه می‌باشد که ارتفاع ۱۲۰۰ متر از سطح دریا قرار دارد استان کرمانشاه با موقعیت ۴۷ درجه و ۴ دقیقه شرقی و ۱۹ درجه و ۳۴ دقیقه شمالی قرار دارد. دمای سالانه هوای بررسی‌های انجام شده در یک دوره ۶۵ ساله ۳/۱۴ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. استان کرمانشاه مساحت ۲۴,۶۴۰ کیلومتر مربع، هفدهمین استان ایران از نظر وسعت به‌شمار می‌رود. شهرستان کرمانشاه از نظر تقسیمات شهرداری به ۸ ناحیه تقسیم شده است که بیمارستان امام رضا در محله باغ ابریشم میدان پرستار کرمانشاه در منطقه ۷ و بیمارستان بیستون در بلوار کیهان‌شهر در منطقه ۳ واقع شده است (شکل‌های (۱) و (۲)).

جدول (۲): مولفه‌های استخراج‌شده از نظرات بیماران و پرسنل

مولفه‌های استخراج‌شده توسط صاحب‌نظران و مؤلفان	مولفه‌های استخراج‌شده توسط بیماران
۱- مساحت سبزی‌نگی	۱- نزدیک بودن مرکز به شهر
۲- فضای داخلی	۲- تمیزی و نظافت
۳- عدم آلودگی صوتی و آرامش	۳- دسترسی به پارکینگ
۴- رنگ و جنس مصالح	۶- دسترسی سواره اضطراری
۵- پوشش گیاهی	۷- اندازه فضا
	۸- وضعیت کفپوش
	۹- عناصر طبیعی مانند آب‌نما و فواره
	۱۰- نگهداری

شده از نظرات صاحب‌نظران و مصاحبه ساختار یافته اولیه با ۱۵ نفر از بیماران هر مجتمع که ۱۳ مولفه به‌دست آمده بود (جدول (۲)) چهار بعد مطابق شکل (۳) و جدول (۳) به‌عنوان ابعاد اصلی پیش‌فرض انتخاب گردید.

به جهت شناسایی عوامل رضایت‌مندی رضایت بیماران بیمارستان از مولفه‌های مؤثر بر مطلوبیت فضای سبز از تحلیل عامل اکتشافی با استفاده از روش مولفه‌های اصلی و اعمال چرخش واریماکس استفاده گردید. با توجه به پیش‌فرض اولیه مفهومی استخراج



شکل (۳): مدل مفهومی، ابعاد و مؤلفه‌های مؤثر در مطلوبیت فضای سبز مراکز درمانی

جدول (۴): پرسشنامه بررسی میزان حس رضایت بیماران از مؤلفه‌های فضای سبز

هدف: تعیین میزان حس رضایت بیماران از مؤلفه‌های فضای سبز بیمارستان امام رضا و بیستون کرمانشاه

سوال	مؤلفه
Q _۱	به چه میزان از فضای سبز این مرکز رضایت دارید؟
Q _۲	به چه میزان از وضعیت کفپوش در این مرکز رضایت دارید؟
Q _۳	به چه میزان از عدم آلودگی صوتی و آرامش در این مرکز رضایت دارید؟
Q _۴	به چه میزان از فضای داخلی این مرکز رضایت دارید؟
Q _۵	به چه میزان از تمیزی و نظافت این مرکز رضایت دارید؟
Q _۶	به چه میزان از نگهداری این مرکز رضایت دارید؟
Q _۷	به چه میزان از عناصر طبیعی مانند آب‌نما و فواره در این مرکز رضایت دارید؟
Q _۸	به چه میزان از دسترسی به پارکینگ در این مرکز رضایت دارید؟
Q _۹	به چه میزان از نزدیک بودن این مرکز به شهر رضایت دارید؟
Q _{۱۰}	به چه میزان از تنوع، رنگ و مصالح این مرکز رضایت دارید؟
Q _{۱۱}	به چه میزان از اندازه فضاهای این مرکز رضایت دارید؟
Q _{۱۲}	به چه میزان از پوشش گیاهی این مرکز رضایت دارید؟
Q _{۱۳}	به چه میزان از دسترسی سواره اضطراری این مرکز رضایت دارید؟

جدول (۳): مؤلفه‌های مؤثر بر مطلوبیت فضای سبز در بیمارستان

ابعاد	ردیف	مؤلفه‌ها
امکانات	۱	نزدیک بودن این مرکز به شهر
	۲	دسترسی سواره اضطراری
	۳	وضعیت کفپوش
	۴	دسترسی به پارکینگ
	۵	نگهداری
روانی- اجتماعی	۶	عناصر طبیعی مانند آب‌نما و فواره
	۷	عدم آلودگی صوتی و آرامش
	۸	تمیزی و نظافت
کمی	۹	مساحت سبزیگی
	۱۰	اندازه فضا
	۱۱	پوشش گیاهی
زیباشناختی	۱۲	رنگ و جنس مصالح
	۱۳	فضای داخلی

جهت آزمون فرضیه ۱۳ سؤال، طبق جدول (۴) در پرسشنامه تدوین و اطلاعات مربوط به دو بیمارستان و در ۳۰۰ نفر مورد سنجش قرار گرفته و نتایج در نرم‌افزار SPSS مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج و بحث

سوال (۱) به چه میزان از مساحت فضای سبز این مرکز رضایت دارید؟ نتایج حاصله در جدول (۵) ارائه شده است.

جدول (۵): نتایج بررسی سؤال Q_۱

شاخص	بیستون	امام رضا	کل
میانگین	۴/۸۷	۴/۲۷	۴/۴۳
انحراف معیار	۰/۹۸	۰/۹۴	۰/۹۰
واریانس	۰/۶۶	۰/۷۶	۰/۸۱
جمع کل	۱۵۰	۱۵۰	۳۰۰
امتیاز از ۱۰۰	۹۱/۴	۸۵/۴	۸۸/۶

سوال (۲) به چه میزان از وضعیت کفپوش در این مرکز رضایت دارید؟ نتایج حاصله در جدول (۶) ارائه شده است.

جدول (۶): نتایج بررسی سؤال Q_۲

شاخص	بیستون	امام رضا	کل
میانگین	۳/۶۳	۳/۵۷	۳/۹۸
انحراف معیار	۰/۹۰	۰/۹۱	۰/۹۱
واریانس	۰/۸۰	۰/۸۲	۰/۸۳
جمع کل	۱۵۰	۱۵۰	۳۰۰
امتیاز از ۱۰۰	۷۸/۴	۷۱	۷۵/۴

سوال (۳) به چه میزان از عدم آلودگی صوتی و آرامش در این مرکز رضایت دارید؟ نتایج حاصله در جدول (۷) ارائه شده است.

جدول (۷): نتایج بررسی سؤال Q_۳

شاخص	بیستون	امام رضا	کل
میانگین	۴/۱۴	۳/۶۷	۳/۷۹
انحراف معیار	۰/۹۸	۰/۹۵	۰/۹۸
واریانس	۰/۹۴	۰/۸۹	۰/۹۷
جمع کل	۱۵۰	۱۵۰	۳۰۰
امتیاز از ۱۰۰	۸۱	۷۱/۴	۷۶/۸

سوال (۴) به چه میزان از فضای داخلی این مرکز رضایت دارید؟ نتایج حاصله در جدول (۸) ارائه شده است.

جدول (۸): نتایج بررسی سؤال Q_۴

شاخص	بیستون	امام رضا	کل
میانگین	۴/۰۱	۳/۵۹	۳/۸۱
انحراف معیار	۱/۸۱	۱/۱۰	۱/۵۳
واریانس	۳/۲۹	۱/۲۲	۲/۳۵
جمع کل	۱۵۰	۱۵۰	۳۰۰
امتیاز از ۱۰۰	۸۰/۲	۷۱/۸	۷۶/۲

سوال (۵) به چه میزان از تمیزی و نظافت این مرکز رضایت دارید؟ نتایج حاصله در جدول (۹) ارائه شده است.

جدول (۹): نتایج بررسی سؤال Q_۵

شاخص	بیستون	امام رضا	کل
میانگین	۳/۸۱	۳/۴۳	۳/۶۳
انحراف معیار	۱/۰۵	۱/۲۰	۱/۱۳
واریانس	۱/۱۰	۱/۴۴	۱/۲۹
جمع کل	۱۵۰	۱۵۰	۳۰۰
امتیاز از ۱۰۰	۷۶/۲	۶۹/۶	۷۲/۶

سوال (۶) به چه میزان از نگهداری این مرکز رضایت دارید؟ نتایج حاصله در جدول (۱۰) ارائه شده است.

جدول (۱۰): نتایج بررسی سؤال Q_۶

شاخص	بیستون	امام رضا	کل
میانگین	۳/۷۸	۲/۸۹	۳/۲۵
انحراف معیار	۱/۷۷	۱/۲۲	۱/۲۱
واریانس	۱/۲۴	۱/۵۴	۱/۴۶
جمع کل	۱۵۰	۱۵۰	۳۰۰
امتیاز از ۱۰۰	۷۰/۶	۵۸/۸	۶۵

سوال ۷) به چه میزان از عناصر طبیعی مانند آب‌نما و فواره در این مرکز رضایت دارید؟ نتایج حاصله در جدول (۱۱) ارائه شده است.

جدول (۱۱): نتایج بررسی سؤال Q_۷

شاخص	بیستون	امام رضا	کل
میانگین	۳/۴۷	۲/۹۴	۳/۲۲
انحراف معیار	۱/۱۱	۱/۲۴	۱/۳۰
واریانس	۱/۵۵	۱/۷۵	۱/۷۱
جمع کل	۱۵۰	۱۵۰	۳۰۰
امتیاز از ۱۰۰	۶۹/۴	۵۸/۸	۶۳/۴

سوال ۸) به چه میزان از دسترسی به پارکینگ در این مرکز رضایت دارید؟ نتایج حاصله در جدول (۱۲) ارائه شده است.

جدول (۱۲): نتایج بررسی سؤال Q_۸

شاخص	بیستون	امام رضا	کل
میانگین	۳/۵۶	۳/۶۰	۳/۵۶
انحراف معیار	۱/۱۱	۱/۰۵	۱/۰۳
واریانس	۱/۰۳	۱/۴۳	۱/۹۸
جمع کل	۱۵۰	۱۵۰	۳۰۰
امتیاز از ۱۰۰	۷۳/۸	۶۹/۴	۷۲/۲

سوال ۹) به چه میزان از نزدیک بودن این مرکز به شهر رضایت دارید؟ نتایج حاصله در جدول (۱۳) ارائه شده است.

جدول (۱۳): نتایج بررسی سؤال Q_۹

شاخص	بیستون	امام رضا	کل
میانگین	۳/۳۳	۳/۵۴	۳/۲۴
انحراف معیار	۱/۰۷	۱/۰۲	۱/۰۵
واریانس	۱/۱۵	۱/۰۴	۱/۱۱
جمع کل	۱۵۰	۱۵۰	۳۰۰
امتیاز از ۱۰۰	۷۷	۷۲	۷۴/۶

سوال ۱۰) به چه میزان از تنوع، رنگ و مصالح این مرکز رضایت دارید؟ نتایج حاصله در جدول (۱۴) ارائه شده است.

جدول (۱۴): نتایج بررسی سؤال Q_{۱۰}

شاخص	بیستون	امام رضا	کل
میانگین	۳/۷۸	۳/۶۷	۳/۷۳
انحراف معیار	۰/۹۷	۱/۵۴	۱/۰۴
واریانس	۰/۸۰	۱/۳۴	۱/۰۹
جمع کل	۱۵۰	۱۵۰	۳۰۰
امتیاز از ۱۰۰	۷۸/۸	۷۰	۷۴/۶

سوال ۱۱) به چه میزان از اندازه فضاهاى این مرکز رضایت دارید؟ نتایج حاصله در جدول (۱۵) ارائه شده است.

جدول (۱۵): نتایج بررسی سؤال Q_{۱۱}

شاخص	بیستون	امام رضا	کل
میانگین	۳/۸۷	۳/۹۱	۳/۷۶
انحراف معیار	۱/۰۵	۱/۳۴	۱/۰۶
واریانس	۱/۴۳	۱/۲۴	۱/۵۴
جمع کل	۱۵۰	۱۵۰	۳۰۰
امتیاز از ۱۰۰	۷۶/۴	۷۵/۶	۷۶

سوال ۱۲) به چه میزان از پوشش گیاهی این مرکز رضایت دارید؟ نتایج حاصله در جدول (۱۶) ارائه شده است.

جدول (۱۶): نتایج بررسی سؤال Q_{۱۲}

شاخص	بیستون	امام رضا	کل
میانگین	۳/۸۸	۳/۵۵	۳/۳۴
انحراف معیار	۰/۷۶	۱/۴۵	۱/۹۸
واریانس	۰/۷۶	۱/۷۷	۱/۴۳
جمع کل	۱۵۰	۱۵۰	۳۰۰
امتیاز از ۱۰۰	۷۸/۲	۷۱/۴	۷۵

سوال (۱۳) به چه میزان از دسترسی سواره اضطراری این مرکز رضایت دارید؟ نتایج حاصله در جدول (۱۷) ارائه شده است.

جدول (۱۷): نتایج بررسی سؤال Q_{۱۳}

شاخص	بیستون	امام رضا	کل
میانگین	۳/۶۵	۳/۵۴	۳/۵۴
انحراف معیار	۱/۰۸	۱/۶۷	۱/۷۷
واریانس	۱/۹۸	۱/۴۴	۱/۴
جمع کل	۱۵۰	۱۵۰	۳۰۰
امتیاز از ۱۰۰	۷۸/۶	۷۳/۸	۷۶/۲

جمع بندی کلیه نتایج در جدول (۱۸) ارائه شده است. فرضیه ۱: مؤلفه‌های مؤثر متعددی بر مطلوبیت فضای سبز در مراکز درمانی وجود دارد.

در جدول (۱۹) مؤلفه‌هایی مؤثر بر کیفیت و مطلوبیت فضای سبز در مراکز درمانی از دید بیماران به ترتیب تأثیرگذاری بر اساس میانگین رتبه آزمون فریدمن ثبت شده‌اند.

فرضیه ۲: میزان رضایت‌مندی بیماران مرکز درمانی بیستون از مؤلفه‌های مؤثر بر مطلوبیت فضای سبز نسبت به مرکز درمانی امام رضا بیشتر است.

جدول (۱۸): بررسی میزان حس رضایت از مؤلفه‌های مؤثر بر کیفیت و مطلوبیت فضای سبز مراکز درمانی بیستون و امام رضا

سؤالات در پرسشنامه	بیستون		امام رضا		کل مجتمع‌ها	
	میانگین	امتیاز	میانگین	امتیاز	میانگین	امتیاز
Q _۱	۴/۵۴	۹۰/۳	۴/۶۶	۸۷/۴	۴/۶۷	۷۸/۶
Q _۲	۳/۷۶	۷۶	۳/۵۵	۷۱	۳/۷۲	۷۹/۴
Q _۳	۴/۰۰	۷۸	۳/۵۷	۷۱/۴	۳/۷۹	۷۵/۸
Q _۴	۴/۰۱	۷۹/۴	۳/۵۹	۷۱/۸	۳/۹۸	۸۰/۲
Q _۵	۳/۸۱	۷۶/۱	۳/۴۳	۶۸/۵۵	۳/۶۳	۷۲/۶
Q _۶	۳/۶۵	۷۱/۳	۲/۸۷	۵۸/۸	۳/۲۵	۶۵
Q _۷	۳/۴۵	۷۰/۷	۲/۹۴	۵۸/۹	۳/۲۲	۶۴/۴
Q _۸	۳/۶۵	۷۱/۸	۳/۴۲	۶۸/۴	۳/۵۶	۷۱/۲
Q _۹	۳/۷۸	۷۸	۳/۶۰	۶۹	۳/۷۳	۷۴/۶
Q _{۱۰}	۳/۹۸	۷۷/۸	۳/۵۰	۷۳	۳/۷۳	۷۴/۶
Q _{۱۱}	۳/۳۴	۷۸/۴	۳/۷۸	۷۵/۴	۳/۷۶	۷۶
Q _{۱۲}	۳/۰۹	۷۸/۲	۳/۵۷	۷۱/۴	۳/۷۵	۷۵
Q _{۱۳}	۳/۹۳	۷۸/۶	۳/۶۹	۷۳/۸	۳/۸۱	۷۶/۲
جمع کل	۴۹/۴۰	۱۰۰۳	۴۴/۸۵	۳۶۹	۴۸/۲۳	۹۶۰/۶
میانگین	۳/۸۹	۷۵/۴۳	۳/۵۲	۶۹/۴۴	۳/۷۱	۷۳/۲۰

جدول (۱۹): رتبه‌بندی مؤلفه‌های مؤثر در مطلوبیت فضای سبز از دید بیماران در دو مرکز درمانی بر اساس میانگین رتبه آزمون فریدمن

رتبه	میانگین رتبه	مؤلفه‌ها
۱	۹/۷۸	مساحت سبزی‌نگی
۲	۸/۷۴	فضای داخلی
۳	۷/۷۲	عدم آلودگی صوتی و آرامش
۴	۷/۵۷	رنگ و جنس مصالح
۵	۷/۴۷	پوشش گیاهی
۶	۷/۴۲	دسترسی سواره اضطراری
۷	۷/۱۲	نزدیک بودن این مرکز به شهر
۸	۶/۷۷	اندازه فضا
۹	۶/۵۳	وضعیت کفپوش
۱۰	۶/۱۱	تمیزی و نظافت
۱۱	۵/۹۹	دسترسی به پارکینگ
۱۲	۵/۴۶	نگهداری
۱۳	۵/۰۴	عناصر طبیعی مانند آب‌نما و فواره

جدول (۲۰): نتایج آزمون T مستقل جهت مقایسه میزان رضایتمندی بیماران دو مرکز درمانی از مؤلفه‌های مؤثر بر مطلوبیت فضای سبز

مؤلفه	گروه	تعداد	میانگین	آماره T	درجه آزادی	سطح معنی‌داری
رضایت از مساحت فضای سبز	بیستون	۱۵۰	۴/۵۷	۲/۹۶	۲۹۹	۰/۰۰
	امام رضا	۱۵۰	۴/۲۷			
فضای داخلی	بیستون	۱۵۰	۳/۸۷	۳/۶۵	۲۹۹	۰/۰۰
	امام رضا	۱۵۰	۳/۵۵			
عدم آلودگی صوتی و آرامش	بیستون	۱۵۰	۴/۲۳	۳/۸۷	۲۹۹	۰/۰۰
	امام رضا	۱۵۰	۳/۴۶			
رنگ و جنس مصالح	بیستون	۱۵۰	۴/۹۸	۲/۶۵	۲۹۹	۰/۰۱
	امام رضا	۱۵۰	۳/۷۶			
پوشش گیاهی	بیستون	۱۵۰	۳/۵۶	۲/۳۲	۲۹۹	۰/۰۰
	امام رضا	۱۵۰	۳/۹۸			
دسترسی سواره اضطراری	بیستون	۱۵۰	۳/۲۲	۴/۵۶	۲۹۹	۰/۰۰
	امام رضا	۱۵۰	۲/۹۴			
نزدیک بودن این مرکز به شهر	بیستون	۱۵۰	۳/۴۷	۳/۸۷	۲۹۹	۰/۰۰
	امام رضا	۱۵۰	۲/۹۴			
اندازه فضا	بیستون	۱۵۰	۳/۶۹	۲/۹۹	۲۹۹	۰/۰۲
	امام رضا	۱۵۰	۳/۴۲			
وضعیت کفپوش	بیستون	۱۵۰	۳/۸۵	۲/۸۷	۲۹۹	۰/۰۴
	امام رضا	۱۵۰	۳/۶۰			

ادامه جدول (۲۰):

۰/۰۰	۲۹۹	۳/۷۰	۳/۷۶	۱۵۰	بیستون	تمیزی و نظافت
			۳/۵۶	۱۵۰	امام رضا	
۰/۰۷	۲۹۹	۰/۳۴	۳/۵۴	۱۵۰	بیستون	دسترسی به پارکینگ
			۳/۴۵	۱۵۰	امام رضا	
۰/۰۰	۲۹۹	۲/۷۸	۳/۰۹	۱۵۰	بیستون	نگهداری
			۳/۷۵	۱۵۰	امام رضا	
۰/۰۵	۲۹۹	۱/۹۶	۳/۳۴	۱۵۰	بیستون	عناصر طبیعی مانند آب‌نما و فواره
			۳/۷۸	۱۵۰	امام رضا	

در جدول (۲۰) در تمام موارد ذکر شده میزان رضایت بیماران مرکز درمانی بیستون از بیماران مرکز درمانی امام رضا بیش تر است (میانگین میزان رضایت بیماران مرکز درمانی بیستون بیش تر از میانگین میزان رضایت بیماران مرکز درمانی امام رضا است). سطح معنی داری برای همه مؤلفه‌ها کم تر از مقدار خطای آزمون (۰/۰۵) است. به عبارت دیگر در مؤلفه‌های ذکر شده به لحاظ آماری تفاوت معناداری بین میزان رضایت بیماران مرکز درمانی بیستون و مرکز درمانی امام رضا وجود دارد.

نتیجه گیری

اساس فلسفه درمان، بر بهبود و کیفیت زندگی استوار است. امروزه فقط زنده ماندن به هر قیمتی مهم نیست و مهم کیفیت زندگی و ارتقای بهبود بیماران است. با نگاه کلی به تحقیق حاضر می‌توان نتیجه گرفت که کیفیت زندگی در بیماران در طی مسیر درمانی کاهش می‌یابد، همچنین فضای سبز بر مبنای ارزیابی اسناد موجود و نظر متخصصان الگوی بسیار مناسب جهت بکارگیری در ایده‌های طراحی در محیط درمانی می‌باشد. ایجاد یک فضای سبز کارآمد می‌تواند در بهبود بیماران موثر باشد. ارتباط بین فضای سبز و سلامت انسان مدت‌ها است که مطرح شده است و

امروزه این فرضیه که فضای سبز مزایای قابل توجهی برای محیط، سلامت فیزیکی و روحی انسان دارد آشکار شده است. طبیعت فرصت نسبتاً مناسبی جهت بازسازی روح و روان انسان فراهم می‌نماید زیرا تعامل با محیط طبیعی ویژگی‌هایی دارد که در تعامل با محیط‌های دیگر کم تر ایجاد می‌گردد. همچنین استفاده از فضای سبز در محیط درمانی باعث کاهش استرس و اضطراب می‌شود. توجه به طراحی محیط درون و بیرون می‌تواند در ارتقای کیفیت زندگی بیماران نقش بسزایی داشته باشد. در این پژوهش با مرور تحلیل‌های به‌دست آمده از قسمت‌های مبانی نظری (کیفی) و همچنین مطالعات میدانی - پرسشنامه (کمی) نتایج زیر قابل ذکر است. مؤلفه‌های مؤثر در مطلوبیت فضای سبز مراکز درمانی در قالب ۱۳ مؤلفه معرفی شدند. در ابتدا به بررسی میزان رضایت بیماران در دو مرکز درمانی پرداخته شد. نتایج به‌دست آمده از امتیاز رضایت کسب شده از ۱۰۰، در مرکز درمانی بیستون ۷۵/۴۳ و در مرکز درمانی امام رضا ۶۹/۴۴ است. نتایج حاکی از آن است که حس رضایت در مرکز درمانی بیستون نسبت به مرکز درمانی امام رضا بیش تر است. در مرکز درمانی بیستون از دید بیماران مؤلفه «مساحت فضای سبز» بیش‌ترین میانگین امتیاز و مؤلفه «عناصر

منابع

- [1] Yaran, A., Behroo, H., 2017, The impact of green space of high-rise residential complex on residents' satisfaction, case study: A residential complex in Tehran. *Armanshahr Architecture & Urban Development*, 9(17), 151. (in Persian)
- [2] Reid, C., Rieves, E.S., Carlson, K., 2022, Perceptions of green space usage, abundance, and quality of green space were associated with better mental health during the COVID-19 pandemic among residents of Denver, *PLoS One*, 17, e0263779.
- [3] Khatibi, S., Zare, L., Kaboli, M.H., 2018, The effect of green space and landscape design on promoting the sense of space belonging to the residential complex, *Hoviatshahr*, 12(3), 19. (in Persian)
- [4] Mass, J., van Dillen, S.M.E., Verheij, R.A., Groenewegen, P.P., 2009, Social contacts as a possible mechanism behind the relation between green space and health, *Health & Place*, 15, 586.
- [5] Behzadpour, M., Gorji Mahlbani, Y., Sohaili, J., 2020, Evaluating the role of nature in neighborhood interactions in residential complexes (A case study of residential complexes of Ekbatan in Tehran and Pardisan in Qom), *Quarterly Journal of Environmental-based Territorial Planning*, 13(48), 131. (in Persian)
- [6] Javanmardi, M.H., Sanaeizadeh, M., 2014, People's preferences for open spaces and their replacement with green roofs in residential architecture (case study of residential complexes in the city of Shiraz), 4th International Conference on Sustainable Development & Urban Construction, Daneshpajooan Pishroo Higher Education Institute, 16 December, Isfahan, Iran. (in Persian)
- [7] Montazeri, J., Montazeri, Sh., 2009, Finding your purpose: A guide to personal fulfillment, Author: Braham, B.J., Revised Edition, Nasle Noandish. (in Persian)
- [8] Sari Aslani, S., 2003, *La république des satisfaits*, (Translation), Author: Galbraith, J.K., Ney Press. (in Persian)
- [9] Ghiyasvand, A., 2011, Examining the level of citizen satisfaction with the municipality's actions to reduce air pollution, *Sociologists' Publications*. (in Persian)

طبیعی مانند آب‌نما و فواره» در سطح ضعیف ارزیابی بوده و در مرکز درمانی امام رضا مؤلفه «مساحت فضای سبز» بیش‌ترین میانگین امتیاز و مؤلفه‌های «نزدیک بودن این مرکز به شهر» و «دسترسی سواره اضطراری» کم‌ترین امتیاز را به خود اختصاص دادند و نشان می‌دهد که می‌بایستی در اولویت برنامه‌ریزی قرار گیرند. به‌طورکلی مؤلفه‌هایی که کم‌ترین امتیاز را دارند، می‌توانند در کاهش مطلوبیت فضای سبز تأثیرگذار باشند و می‌بایستی در برنامه‌ریزی به جهت افزایش مطلوبیت برای بیماران در اولویت قرار بگیرند. در فرضیه ۱ در رتبه‌بندی مؤلفه‌های رضایت بیماران در دو مرکز درمانی، «مساحت فضای سبز» با میانگین نمره ۹/۷۸ بیش‌ترین امتیاز و عناصر طبیعی مانند «آب‌نما و فواره» با میانگین نمره ۵/۰۴ کم‌ترین امتیاز را داشته‌اند که بایستی در اولویت برنامه‌ریزی قرار گیرند. در فرضیه ۲ در تمام موارد ذکر شده میزان رضایت بیماران، مرکز درمانی بیستون از مؤلفه‌های مطلوبیت فضای سبز نسبت به بیماران مرکز درمانی امام رضا بیش‌تر است. به‌عبارت دیگر با افزایش مساحت فضای سبز، میزان رضایت‌مندی بیماران از مرکز درمانی نیز افزایش پیدا می‌کند.

قدردانی

بدینوسیله از معاونت محترم بیمارستان بیستون و بیمارستان امام رضا و جناب آقای دکتر مرتضی صائب و جناب آقای دکتر وحید فیض‌اللهی بابت همکاری در نگارش مقاله حاضر تشکر و قدردانی می‌شود.

تعارض منافع

نویسندگان هیچگونه تعارض منافی برای اعلام ندارند.

- [20] Zarei, P., 2017, A study to determine the level of satisfaction of patients with the health transformation plan in Imam Reza Kermanshah Hospital, 2nd International Conference on Management and Accounting, Salehan Higher Education Institute, 5 July, Tehran, Iran. (in Persian)
- [21] Hami, A., Tarashkar, M., 2017, Studying the role of hospital green spaces in the spiritual recovery of patients (case study: Tabriz city hospitals), 1st International Congress of Multidisciplinary Academic Research in Urbanism and Architecture, Kian Tarhe Danesh, 9 May, Tabriz, Iran. (in Persian)
- [22] Sabouri, S., Shahmoradi, F., Nikzad, S., 2018, Exploration of indoor environmental qualities of hospitals in accordance with patients' and staffs' viewpoints (case study: Shams Hospital in Tabriz), Journal of Iranian Architecture and Urbanism, 8(2), 49. (in Persian)
- [23] Karimi, M., Abedi, M.H., 2016, Investigating the impact of interior architecture in healing environments on the recovery process from the patients' perspective, case study: Shohada and Prophet Akram Hospitals in Gonbad Kavus, International Conference on Civil Engineering, Architecture & Cityscape, Istanbul University, 28 July, Istanbul, Turkey. (in Persian)
- [24] Weerasuriya, R., Henderson-Wilson, C., Townsend, M., 2019, Accessing green spaces within a healthcare setting: A mixed studies review of barriers and facilitators, HERD: Health Environments Research & Design, 12(3), 119.
- [25] Adhikary, G., Shawon, M.S.R., Ali, M.W., Shamsuzzaman, M., Ahmed, S., Shackelford, K.A., Woldeab, A., Alam, N., Lim, S.S., Levine, A., Gakidou, E., Uddin, M.J., 2018, Factors influencing patients' satisfaction at different levels of health facilities in Bangladesh: Results from patient exit interviews, PLoS One, 13(5):e0196643.
- [10] Qoli Poor, M., Partoi, P., 2014, Comparative study on functional diversity effectiveness on residential satisfaction (case study: residential areas of Narmak and Tehran pars), International Journal of Urban and Rural Management, 13(35), 69. (in Persian)
- [11] Salehifard, M., Khakpour, B., Rafiei, H., Tavanghar, M., 2010, An analysis of the social dimensions of urban green spaces with an emphasis on citizens' perspectives (case study: Mashhad metropolis), Journal of Geographic Space, 10(29), 51. (in Persian)
- [12] Hamid, N., Babamiri, M., 2012, The relationship of green space and mental health, Armaghane Danesh, 17(4), 309. (in Persian)
- [13] Mirmogtadaei, M., 2009, Criteria for assessing the possibility of forming, recording, and transmitting collective memories in the city, Honarhaye Ziba, 37, 5. (in Persian)
- [14] Cooper, M.C., 2003, Healing havens, Landscape Architecture, August, 84.
- [15] Mahmoudi, Gh., 2013, Environmental psychology, (Translation), Author: McAndrew, F.T., 2nd Edition, Vania Press. (in Persian)
- [16] Hosseini, S.B., Sadeghi, A., Piryaee, A., 2022, Realization of healing hospital environment criteria using a patient-centered approach; case study: investigating the satisfaction of patients hospitalized at the Imam Khomeini Hospital of Tehran with the quality of hospital spaces, Armanshahr Architecture & Urban Development, 15(39), 27. (in Persian)
- [17] Najafi, A., Tabaian, S.M., Attari A., 2016, Effect of interior design of healthcare environments on patients function hospitalized in psychiatric department, Journal of Research in Behavioral Sciences, 14(3), 281. (in Persian)
- [18] Rahmanian, S., Mahmoudi, M., (2020). Study of the effect of light and color on the medical interior design; case study: Shahid Rahimi and Shohada-ye Ashayer Hospitals, Khorramabad City, Iran. Armanshahr Architecture & Urban Development, 13(31), 67. (in Persian)
- [19] Pagiri GhalehNoei, M., Massoud, M., Yarmohammadian, M.H., 2020, Hospital architecture design with a patient-centered approach: Identifying factors affecting the patient's lived experience of the sense of place in the therapeutic space, Hakim, 23(4), 448. (in Persian)

“Research article”

Examining the level of satisfaction with the test components on the desirability of green space (Case study: Emam Reza and Bisetoon hospitals in Kermanshah)

Sahar Toofan¹ Behnam Shiroyeh Zad^{2*}

¹Department of Architecture, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

²Department of Landscape Architecture, Aras Branch, Islamic Azad University, Jolfa, Iran

*Corresponding author: behnamshiro95@gmail.com

(Received: 29 May 2024, Accepted: 25 September 2024)

Abstract

The design of treatment spaces is very important, spending long periods of time in treatment environments is usually an unpleasant and very stressful experience for staff, visitors, companions of the patient and the patient. In the present study, the level of satisfaction of the patients of two medical centers, Imam Reza and Bisetoon, Kermanshah, was investigated regarding the factors affecting the desirability of green space. This research is descriptive-analytical. The components of green space were identified and based on the review of texts, related studies and experts' opinions in the form of a researcher's questionnaire and with the approval of the relevant experts, it was designed in the form of a Likert scale (five options) and selected by 150 patients of Imam Reza Hospital and 150 patients of Bisetoon Hospital. And a total of 300 questionnaires were completed. Statistical analyzes were performed using SPSS software, and descriptive statistics (mean, standard deviation, variance) were used to describe the components of the research. In the inferential statistics section, the correlation coefficient was used to investigate the relationship between the area of green space and the level of patient satisfaction with the treatment center, the independent t-test was used to compare the level of satisfaction of the patients of the two mentioned hospitals, and the Friedman test was used to identify the components of patient satisfaction. The results indicate that the feeling of satisfaction is higher in Bisetoon Medical Center compared to Imam Reza Medical Center, and among the 13 factors affecting the satisfaction of the patients of the two medical centers, the area of green space has the highest visibility score and natural elements such as fountains and fountains have the lowest score. They had the privilege. In other words, with the increase in the area of green space, the level of satisfaction of patients with the treatment center also increases.

Conflict of interest: None declared.

Keywords: Hospital, Patient satisfaction, Green space, Emam Reza Hospital, Bistoon Hospital



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

دوره ۱، شماره ۳، پیاپی ۳
پاییز ۱۴۰۳، صفحات ۸۹-۱۱۲

"مقاله پژوهشی"

تبیین مورفولوژی شهری بر تاب‌آوری جامعه در مدیریت پایداری توسعه شهری (گستره واکاوی: بافت شهری تاریخی کرمان)

محمد دبدبه^{۱*}، یاشار قراچمنی اصل^۲، امیرحسین فرحی‌نیا^۳

۱. دانش‌آموخته دکتری، گروه معماری و شهرسازی، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

۲. دانش‌آموخته دکتری معماری، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران

۳. استادیار گروه معماری و شهرسازی، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: mohammaddabdabeh@yahoo.com

(دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۴/۱۸، پذیرش نهایی: ۱۴۰۳/۰۸/۱۴)

چکیده

گسترش فیزیکی شهر، به‌ویژه در شهرهایی که ویژگی‌های طبیعی متمایزی دارند، بدون سامان‌دهی سازگار بر ساختارهای طبیعی، تاریخی و الگوهای رشد مورفولوژی شهری می‌تواند به شکست فرایندهای توسعه شهری منجر شود. شهر کرمان به‌عنوان یکی از شهرهای تاریخی ایران با هویت فرهنگی بی‌همتا، در برابر خسارات ناشی از توسعه صنعتی و مدرن مصون نمانده است. آسیب‌پذیری‌های فیزیکی و اجتماعی به‌مثابه توسعه شهری با نگاه سرمایه‌ای و ارزشی به زمین، گسترش سبک زندگی جدید با ارزش‌های خاص خود، نادیده‌گرفتن ساختار طبیعی و بافت تاریخی به‌عنوان یک الگوی پایدار، طراحی شهری بر پایه خودرو محور و همچنین پدیده مهاجرت و رشد پراکنده رسمی و غیررسمی، شهر کرمان را به‌سوی چالش‌های گسترده سوق داده است. به‌طور خاص پژوهش حاضر، به بررسی و ارزیابی تاب‌آوری جامعه به روش تحقیق کمی و واکاوی عوامل مورفولوژی شهری مؤثر بر کاهش آسیب‌پذیری در شهرهای تاریخی از دیدگاه ساکنان پرداخته است. پرسش اصلی تحقیق بر آن است که چگونه می‌توان عوامل مورفولوژی شهری را با هدف افزایش تاب‌آوری جامعه در بافت شهری تاریخی کرمان طبقه‌بندی کرد؟ سنجش فرضیه‌های تحقیق، اطلاعات میدانی از راهبرد پیمایشی تبیین و پراگش در ۳۸۸ پرسش‌نامه تدوین شده است. در تجزیه و تحلیل اطلاعات از آزمون واکاوی عاملی اکتشافی (EFA)، برای گروه‌بندی عوامل استفاده شد. یافته‌ها حاکی از آن است که رتبه‌بندی طرح‌ریزی گزینه‌های مورفولوژی شهری در بافت تاریخی کرمان در سه دسته قابل تقسیم است: «عوامل ثابت در وضعیت کنونی»، «عوامل چالش‌زا»، و «عوامل بی‌تفاوت». عوامل چالش‌زا؛ محورهای فضاهای درمانی (ضریب بار ۰/۹۳۲)، اندازه‌گیری دسترسی سواره (ضریب بار ۰/۹۲۶)، پیاده (ضریب بار ۰/۶۶۴)، تراکم کاربری‌های پرجمعیت (ضریب بار ۰/۹۰۵)، کیفیت ساختمان‌ها (ضریب بار ۰/۸۶۶)، ساختمان‌های متروکه و ویران (ضریب بار ۰/۷۸۱)، و محورهای فضاهای عمومی (ضریب بار ۰/۷۲۹) است. این تحقیق نشان داد برنامه‌ریزی، مدیریت اصولی و توجه به الگوهای پایدار بافت تاریخی و طبیعی شهر، کلید کاهش آسیب‌پذیری و افزایش تاب‌آوری شهری در جهت توسعه شهری مؤثر خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: توسعه شهری، مورفولوژی شهری، الگوی پایدار، تاب‌آوری جامعه، بافت شهری تاریخی کرمان

مقدمه

امروزه، پایداری و تاب‌آوری در توسعه شهری به عنوان یکی از مباحث کلیدی در مدیریت شهری و برنامه‌ریزی فضاهای شهری مطرح است (۱). مورفولوژی شهری، که به تحلیل ساختار و شکل‌گیری فضاهای شهری می‌پردازد، نقشی بنیادین در تقویت تاب‌آوری اجتماعی و محیطی دارد (۲). به طوری که این مفهوم نه تنها بر شکل فیزیکی و کالبدی شهر تأثیر می‌گذارد، بلکه روابط اجتماعی-فرهنگی و اقتصادی-سیاسی را نیز در خود جای می‌دهد (۳). توجه به الگوهای فضایی، توزیع کاربری‌ها و نحوه تعامل بین ساختارهای کالبدی و ساکنان شهر در مواجهه با بحران‌های طبیعی و انسانی از جمله: موضوعات مهم در بحث تاب‌آوری و پایداری شهری است (۴و۵). بیشتر جمعیت سراسر جهان اکنون در شهرها زندگی می‌کنند و رشد شهرنشینی به طور خاص، در کشورهای در حال توسعه، رو به افزایش است. این رشد شهری در جهت افزایش توسعه نیاز به برنامه‌ریزی شهری دارد، اما اگر این برنامه‌ریزی به درستی صورت نگیرد، می‌تواند منجر به افزایش نابرابری و مشکلات اجتماعی شود (۶). تحقیقات حاکی از آن است که ارتباطات پیچیده بین مورفولوژی شهری و مسائل اجتماعی وجود دارد و توسعه شهری می‌تواند تأثیر مثبت یا منفی بر تاب‌آوری‌های اجتماعی داشته باشد. برای درک بهتر این روابط، نیاز به تحقیقات بیشتر در حوزه‌های مختلف و بررسی دقیق‌تر ویژگی‌های مختلف مورفولوژی شهری است. به‌واقع، مورفولوژی شهری یک حوزه اساسی برای شناخت و کنترل شکل و الگوی فضای شهری است. شهر به عنوان محل تلاقی

و ترکیب مختلف فعالیت‌های انسانی، تحت تأثیر نیروهای اجتماعی، فرهنگی، اقتصادی و حتی سیاسی و غیره، قرار می‌گیرد و شکل‌گیری و تحول آن توسط الگوهای رفتاری انسانی و تاریخی شهرها رقم می‌خورد (۷). امروزه، بُعد توسعه شهری با چالش‌های فراوانی روبه‌رو است، از جمله: مسائل محیط زیستی، تغییرات اقلیمی، مهاجرت‌های گسترده، و ناامنی در سکونتگاه‌های غیررسمی (۸). این چالش‌ها نیازمند رویکردهای نوینی در برنامه‌ریزی شهری و طراحی محیط جدید شهری است تا به توسعه پایدار و مدیریت مناسب شهرها دامن زده و از افزایش آسیب‌های محیطی و اجتماعی جلوگیری شود. اساساً، شهرها امروزه با بحران‌هایی مواجه هستند که اصل این بحران‌ها از نادیده گرفتن منشأ طبیعی آن‌ها و نبود برنامه‌ریزی دقیق کالبدی-فضایی آن‌ها است. شکل و فرم شهرها مستقیماً تأثیرگذار بر ادراک و ذهنیت ساکنان دارد و جزئی از هویت تاریخی-اجتماعی آن‌هاست (۹). توسعه کالبدی شهری بدون توجه به ساختارهای طبیعی و تاریخی و الگوهای رشد مورفولوژی می‌تواند به بحران منجر شود، به‌ویژه در شهرهایی که با ویژگی‌های طبیعی خاصی روبه‌رو هستند (۱۰). این بیگانگی با محیط ساخته شده، باعث افزایش آسیب‌پذیری فردی و اجتماعی در شهر می‌شود. بدین سبب، توسعه کالبدی و مورفولوژی شهری باید با توجه به محیط طبیعی، ویژگی‌های زمینه‌ای، تجربه زندگی ساکنان و ادراکات آن‌ها از محیط شکل گرفته صورت گیرد تا به نحو احسن با محیط موجود هماهنگ شود.

بافت‌های شهری تاریخی ایران به‌عنوان میراث فرهنگی و اقتصادی یک جامعه، نیازمند توجه

شهروندان است، تا بتوان با تحلیل مؤلفه‌های عامل، به روش‌هایی برای حداکثر کردن کاهش آسیب‌پذیری‌ها پی برد. با توجه به بررسی موضوع مورد واکاوی، شهر کرمان به‌عنوان یکی از شهرهای با تاریخ و هویت میراث ملی ایران، متأثر از آسیب‌های توسعه صنعتی و مدرن شده است. این شهر، به‌مانند بسیاری از شهرهای تاریخی ایران، با چالش‌هایی همچون بی‌توجهی به زمینه‌ها و بافت‌های تاریخی روبه‌رو است. روندهای عصر نوسازی شهری، همراه با نگاه سرمایه‌ای به زمین، برنامه‌ریزی کالبدی بر اساس نگاه ارزشی، ترویج و روایی سبک زندگی نو و نادیده‌گرفتن ساختارهای طبیعی و تاریخی، منجر به ایجاد آسیب‌پذیری‌های کالبدی و اجتماعی در شهر کرمان شده است. طوری‌که این مسائل شهر را به سمت بحران و بروز مشکلات جدی‌تر در مدیریت سوق می‌دهند.

پیشینه پژوهش

مورفولوژی شهری یکی از رویکردهای مهم کالبدی در بررسی شهرهاست که از اواخر قرن ۱۹ میلادی، به عنوان بخشی از علم برنامه‌ریزی محیطی شناخته شده است. طوری‌که در دهه‌های ۶۰ و ۷۰ میلادی، مفاهیم این علم توسط بنیان‌گذار مکتب مورفولوژی شهری؛ کانزن^۱ و نیز نوربرگ-شولتز^۲ مجدداً تعریف شده و به حوزه‌های علوم رفتاری و پدیدارشناسی محیطی وارد شدند (۱۴ و ۱۵). با تمرکز بر آلودگی‌های محیطی و توسعه پایدار شهری، این رویکرد می‌تواند به فهم بهتر تأثیرات کالبدی بر پایداری و کاهش آلودگی‌های محیطی در شهرها کمک کند. مسئله اصلی در این روش واکاوی، شناسایی و

ویژه در فرایندهای توسعه پایدار هستند (۱۱). به‌طور مشخص، شهر کرمان یکی از بافت‌های شهری تاریخی کشور، نمونه‌ای شاخص از این نوع فضاها شهری است (۱۲). درک صحیح از مورفولوژی بافت‌های شهری تاریخی و بررسی عوامل تأثیرگذار بر تاب‌آوری آن‌ها می‌تواند به بهبود مدیریت بحران‌ها و افزایش پایداری محیط شهری کمک کند (۱۳). بافت شهری تاریخی کرمان، با تنوع و پیچیدگی‌های خاص خود، چالش‌های متعددی را در حوزه توسعه پایدار و تاب‌آوری جامعه در رویارویی با بحران‌ها به همراه دارد. از این‌رو، واکاوی دقیق مورفولوژی شهری این منطقه، به‌منظور شناسایی الگوهای فضایی و ساختاری که بر تاب‌آوری جامعه تأثیر می‌گذارند، امری ضروری است. این پژوهش بر آن است تا با بررسی مورفولوژی بافت شهری تاریخی کرمان و تحلیل نقش آن در تاب‌آوری جامعه، راهکارهایی را برای مدیریت پایدار توسعه شهری ارائه دهد. بر همین اساس، تحقیق موردتیین در حوزه بافت شهری، فرم کالبدی ساختمان‌ها و برنامه‌ریزی فضا، به‌منظور ارتباط این عناصر با جوانب اجتماعی و شناخت ویژگی‌های الگوی مورفولوژی شهری، یکی از حیطه‌های اساسی محیط زیست در این حوزه است. هدف اصلی این تحقیقات، کاهش تاب‌آوری‌های اجتماعی است و نیز، وجود فعالیت‌ها و سیستم‌های توسعه رسمی و غیررسمی، با تنوع و پوشش چندگانه، که منجر به پیچیدگی بیشتر در حوزه نفوذ و فعالیت آن‌ها می‌شود. به‌طور مشخص، هدف از مطالعات، ارزیابی تأثیر برنامه‌ریزی مورفولوژی شهری بر تاب‌آوری جامعه

¹ Conzen

² Norberg-Schulz

تفتیش ارتباط میان عناصر فیزیکی و مادی شهر با نیروهای اجتماعی-فرهنگی-اقتصادی-سیاسی و غیره، است که به شکل‌گیری آن کمک می‌کنند. مورفولوژی شهری به تحلیل سیستماتیک فرم، نقشه، ساختار و عملکرد بافت‌های گوناگون شهری، ریشه‌ها و الگوهای توسعه آن‌ها در طول زمان می‌پردازد (۱۶). در دهه ۹۰ میلادی، پژوهش‌های مربوط به مورفولوژی شهری بر مطالعه بافت‌های فیزیکی و کالبدی شهر و فرایندهای شکل‌دهنده انسانی متمرکز شد. در این دهه، مفهوم مورفولوژی مجدداً مورد توجه قرار گرفت، که رویکردی جامع به کل شهر را مطرح می‌کرد و تمامی مقیاس‌های منظر مصنوع را مورد بررسی قرار می‌داد. این رویکرد بر این باور است که شهر یک موجودیت پویا و در حال تغییر است و با سازندگان و ساکنانش رابطه‌ای دیالکتیکی برقرار می‌کند و فرم شهر را به‌عنوان محصولی از گذر زمان در نظر می‌گیرد. این دیدگاه می‌تواند در مطالعه آلودگی‌های محیطی و توسعه پایدار شهری نیز مفید باشد، چرا که درک بهتر از ساختار و تحولات شهری می‌تواند به کاهش آلودگی‌ها و بهبود پایداری کمک کند که در این پژوهش به این موضوع توجه شده است.

شیرر^۱ و استانیلوف^۲ مورفولوژی شهری را به‌عنوان گنش فرم شهرها در طول زمان تعریف می‌کنند. این تعریف نشان‌دهنده تأثیر متقابل و پویای بین عناصر فیزیکی و کارکردهای اجتماعی و اقتصادی شهرها است، که با گذر زمان تغییر و تکامل می‌یابد. به‌طور خاص، با تمرکز بر آلودگی‌های محیطی و توسعه

پایدار شهری، می‌توان اذعان داشت؛ تحلیل مورفولوژی شهری به ما کمک می‌کند تا به درک بهتری از الگوهای رشد و تغییرات شهری دست یابیم و از این طریق، راهکارهایی برای کاهش آلودگی و ارتقای پایداری شهرها پیشنهاد دهیم (۱۷). آلبرتی^۳ بر این باور است که سیستم‌های اکولوژیک شهری، نتیجه تعاملات پیچیده میان عوامل اجتماعی، اقتصادی، نهادی و محیطی هستند. او تأکید دارد این تعاملات باعث ایجاد پیچیدگی‌هایی در فضاهای ساخته شده توسط انسان می‌شوند که عملکرد اکوسیستم‌های محلی و کلان را در سطح جهانی تحت تأثیر قرار می‌دهند (۱۸). دیویورا^۴ در گفتمان خود به برجسته‌سازی شکل شهر پرداخته و عناصر کالبدی شهر را به‌عنوان مهم‌ترین موضوع در مورفولوژی شهر معرفی کرده است (۱۹). گاتیه^۵ و گیلیلاند^۶ مورفولوژی شهری را به‌عنوان مطالعه فرم شهرها و شیوه انجام این مطالعه معرفی کردند. این رویکرد به تحلیل دقیق شکل‌گیری و تحول ساختارهای شهری، نحوه استفاده از فضاها و تأثیرات اجتماعی و اقتصادی ناشی از این تغییرات می‌پردازد. بدین منظور در چارچوب آلودگی‌های محیطی و توسعه پایدار شهری، فهم دقیق از مورفولوژی شهری می‌تواند به شناسایی عوامل مؤثر بر تولید آلودگی و یافتن راه‌حل‌های بهینه برای کاهش آن و ارتقای پایداری کمک کند. این تحلیل، برنامه‌ریزان را قادر می‌سازد تا راهبردهای مؤثر برای مدیریت و بهبود محیط زیست شهری را تدوین کنند (۲۰). ایلوگوسی^۷ و همکاران در مقاله با عنوان «تاب‌آوری شهری در برابر

³ Alberti

⁴ De Oliveira

⁵ Gauthier

⁶ Gilliland

⁷ Ilugbusi

¹ Scheer

² Stanilov

به ۴ سناریو برای آینده بافت تاریخی شهر اشاره کرده است به مثابه سناریوی کاملاً مطلوب، نیمه مطلوب، بحرانی و کاملاً بحرانی. در نتیجه آنان بر این باورند که با برنامه‌ریزی دقیق و توجه به عوامل کلیدی، می‌توان از بروز بحران‌ها جلوگیری کرد و زمینه بازآفرینی پایدار را فراهم ساخت (۲۲). سربازی و همکاران در تفحص مورد تبیین خود با عنوان «سنجش و ارزیابی راهبردی بازآفرینی بافت‌های تاریخی (مطالعه موردی: حوزه ۲ بافت تاریخی کرمان)»؛ به واکاوی کیفیت و قابلیت‌های این محدوده پرداخته‌اند. این پژوهش با استفاده از روش‌های توصیفی و تحلیلی کمی و کیفی به تحلیل ابعاد مختلف بافت‌های تاریخی نگریسته است. داده‌ها از طریق پرسش‌نامه و تحلیل نرم‌افزاری جمع‌آوری و بررسی شدند. نتایج بر آن است که حوزه ۲ بافت تاریخی کرمان از ظرفیت مناسبی برای بهره‌مندی از مزایای بازآفرینی برخوردار است. به‌ویژه، می‌توان با به‌کارگیری این ظرفیت‌ها، کیفیت محیط شهری و زندگی ساکنان را بهبود بخشید. به‌طور کلی، این پژوهش تأکید می‌کند که بافت تاریخی حوزه ۲ کرمان توانایی لازم برای تحول و بهبود وضعیت خود را دارد و می‌تواند به یکی از بخش‌های فعال و پایدار شهر تبدیل شود (۲۳). بقایی و همکاران در پژوهشی با عنوان «ارزیابی و تبیین مدل طراحی شهری پایدار با رویکرد تراکم مینا در بافت شهری (نمونه موردی: منطقه ۲ تهران)»؛ به بررسی مفهوم طراحی شهری در مورفولوژی شهری و استخراج چارچوب بهینه برای فرم کالبدی شهر با تأکید بر کارایی انرژی پرداختند. طوری‌که با تحلیل و بررسی پارامترهای مختلف محیطی و انرژی مصرفی در شهر، سعی نمودند الگوی پایداری را برای طراحی فضاهای

تغییرات اقلیمی: مرور استراتژی‌های سازگاری و نوآوری‌های زیرساختی»؛ به تفتیش اهمیت تاب‌آوری شهری در مواجهه با چالش‌های تغییرات اقلیمی می‌پردازند. این جستار، استراتژی‌های مختلفی را که شهرها برای افزایش تاب‌آوری خود به کار می‌برند، از جمله: زیرساخت‌های سبز (به مانند جنگل‌های شهری و سطوح نفوذپذیر)، و شیوه‌های پایدار برنامه‌ریزی شهری، مورد بررسی قرار می‌دهد. همچنین نوآوری‌های زیرساختی، به مثابه طراحی ساختمان‌های مقاوم و سیستم‌های هوشمند، را به عنوان عوامل کلیدی در تقویت تاب‌آوری شهری معرفی می‌کند. به‌طور مشخص پژوهش بر اهمیت مشارکت اجتماعی و توانمندسازی جامعه نیز تأکید دارد و بر آن تأکید داشته که ترکیب این استراتژی‌ها می‌تواند به شهرها کمک کند تا با چالش‌های تغییرات اقلیمی مقابله کرده و رفاه ساکنان را تضمین کنند (۲۱). اصغر حیدری و به اتفاق آراء در تحقیق مطالعه خود با عنوان «آینده‌نگاری و شناسایی سناریوهای بازآفرینی بافت‌های ناکارآمد شهری (مورد مطالعه: بافت تاریخی شهر کرمان)»؛ به تبیین عوامل محرک کلیدی و سناریوهای ممکن برای بازآفرینی بافت تاریخی این شهر پرداختند. به‌طور خاص، آن‌ها ۹ شاخص اصلی را به عنوان عوامل محرک بازآفرینی شناسایی کردند که عبارت‌اند از حفظ اصالت طرح و اثر، تنوع عملکردی و ایجاد سرزندگی، استفاده مجدد از ابنیه و معاصرسازی، پرداخت یارانه و تسهیلات بانکی، مشارکت مردم و بخش خصوصی، نقش فرهنگ و صنایع فرهنگی، ایجاد ابزارهای حقوقی و قانونی، ایجاد مدیریت یکپارچه بافت تاریخی و الگوی جامع برنامه‌ریز و مدیریت بازآفرینی. همچنین این پژوهش

شهری تعیین کنند (۲۴). محمودزاده و همکاران در مطالعه خود با عنوان «مدل‌سازی تأثیرات حاشیه‌نشینی بر تغییرات شهر ارومیه و پیش‌بینی توسعه فیزیکی شهر با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای تا افق ۱۴۱۰»؛ به بررسی رشد حاشیه‌نشینی و تحلیل لکه‌های رشد حاشیه‌نشینی در شهر ارومیه در بازه سال‌های ۱۳۶۳ تا ۱۳۹۵ شمسی، و پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی تا سال ۱۴۱۰ شمسی پرداختند. برای این منظور، از تصاویر ماهواره‌ای و مدل‌های زنجیره مارکوف و سلول‌های خودکار استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که مساحت اراضی ساخته‌شده شهری افزایش یافته و اراضی باغ و کشاورزی به مقدار قابل توجهی کاهش یافته است. این مطالعه همچنین پیش‌بینی می‌کند که تا سال ۱۴۱۰ شمسی، مساحت اراضی ساخته‌شده شهری محدود به طرح جامع خواهد شد، درحالی‌که مساحت باغ‌ها و اراضی کشاورزی کاهش خواهد یافت (۲۵). داداش‌پور و علی‌دادی در پژوهشی با عنوان «تحلیل ریخت‌شناسانه ساختار فضایی توزیع جمعیت در منطقه کلان‌شهری تهران»؛ به تحلیل توزیع جمعیت منطقه کلان‌شهر تهران بر اساس عوامل ۳ گانه جمعیت، فعالیت و نواحی ساخته‌شده پرداخته‌اند. به‌منظور درک ساختار فضایی و الگوی فضایی آن از روش تحلیل رگرسیونی در این تحقیق استفاده شده است و داده‌های مورد استفاده شامل جمعیت، اشتغال مراکز و شبکه‌های ارتباطی می‌باشند. نتایج نشان می‌دهند که رابطه بین توزیع جمعیت و مرکز شهر ضعیف بوده ولی شبکه‌های ارتباطی تأثیر بیشتری می‌توانند داشته باشند. همچنین، توزیع جمعیت با زیر مراکز فعالیتی در منطقه کلان‌شهری تهران مرتبط بوده و بیش‌ترین تغییرات تراکم جمعیت از طریق این مراکز

تبیین می‌شود. از طرفی، شبکه‌های ارتباطی اصلی‌ترین عامل شکل‌دهنده ساختار فضایی منطقه محسوب می‌شوند و ظهور زیرمراکز فعالیتی، الگوی فضایی چند مرکزی را در منطقه کلان‌شهری تهران پیش‌بینی می‌کند (۲۶). حسینی و همکاران در پژوهشی با عنوان «تحلیل ساختار فضایی شهری با تأکید بر بُعد جمعیتی رویکرد ریخت‌شناسی شهر چند هسته‌ای. مطالعه موردی: شهر تهران»؛ به واکاوی ساختار فضایی شهری با تأکید بر رویکرد مورفولوژی شهری چند هسته‌ای بر اساس الگوی فضایی کانون‌های جمعیتی شهر تهران نگاه داشته‌اند. برای تعیین واحد فضایی تحلیل، از مفهوم مسئله واحد در ناحیه‌ای که قابلیت اصلاح دارد، بهره گرفته شده و نتایج پژوهش بر آن است که توزیع فضایی جمعیت تهران دارای خودهم‌بستگی فضایی و توزیع خوشه‌ای است. این تحلیل‌ها نشان می‌دهند که شهر تهران از الگوی تک‌هسته‌ای فاصله گرفته و به سمت یک ساختار چند هسته‌ای در حال تحول و توسعه شهری است (۲۷). جمالی در پژوهش خود با عنوان «بررسی جایگاه گونه-ریخت‌شناسی شهری در طرح‌های توسعه کالبدی ایران مطالعه موردی کلان‌شهر تبریز»؛ به بررسی نقش ملاحظات گونه‌شناسی و مورفولوژی شهری در طرح‌های توسعه شهری ایران می‌پردازد. محتوای طرح‌های کالبدی با اصول گونه مورفولوژی مقایسه شده و نشان می‌دهد که بسیاری از این طرح‌ها به صورت اتفاقی و بی‌توجه به نیازهای شکلی شهرها آماده می‌شوند. در نتیجه، ضرورت توجه به این اصول در طراحی شهری مورد تأکید قرار می‌گیرد (۲۸).

مبانی نظری

- مورفولوژی شهری

واژه مورفولوژی به مطالعه شکل، فرم، ساختار خارجی یا نحوه آرایش اشیاء می‌پردازد (۲۹). علم مورفولوژی شهری به بررسی فرایند شکل‌گیری شهرها و نتایج آن‌ها می‌پردازد. شهرها مجموعه‌هایی از خرده عناصر هستند که می‌توان روابط میان این اجزاء را از جزء به کل تعیین و سلسله مراتب موجود را سازمان‌دهی کرد. پایه اصلی مورفولوژی شهری همین سلسله مراتب است. مؤلفه‌هایی نظیر بافت شهری، بستر طبیعی، شبکه خیابان‌ها، نظام قطعه‌بندی زمین و نظام ساختمان‌ها به شکل‌دهی مورفولوژی شهر کمک می‌کنند. به بیانی دیگر، سیاست‌های دانش فضایی در ارتباط با کنش‌های اجتماعی در مورفولوژی شهری تأثیر می‌گذارند و ساختار فضای شهری نتیجه تعامل این نیروهاست (۳۰). به‌طور خاص، مورفولوژی شهری براساس منشأ نظری و نوع نگاه به شهر را می‌توان به ۳ مکتب اصلی؛ انگلیسی، ایتالیایی و فرانسوی، تقسیم نمود. مکتب انگلیسی؛ به مسائل منظر شهری و منظر فرهنگی، به‌ویژه در شهرهای صنعتی، توجه ویژه‌ای دارد در دیدگاه مایکل رابرت گونتر کانزن، تفسیر و خوانش شکل شهر بر ۳ محور اصلی استوار است: ۱- نقشه شهر یا الگوی خیابان‌ها، ۲- بافت ساختمان‌ها و ۳- الگوی کاربری زمین. مفاهیم مهم دیگر در این مکتب شامل کمر بند حاشیه‌ای، دوره‌های تغییر قطعات زمین و آبادسازی بازار هستند. در مکاتب ایتالیایی و

فرانسوی؛ شناخت ساختار شهرها تنها از طریق مطالعه سیر تاریخی و مبنا قرار دادن گونه‌شناسی بناها ممکن است. فرم و ساختار هر شهر نتیجه باورها، اولویت‌ها، حرکات و اعمالی است که در قالب ساختمان‌ها و فضاهای پیرامون‌شان شکل گرفته‌اند و این‌ها بافت شهری را تشکیل می‌دهند (۳۱). به عبارتی، روند تغییر شکل شهرها در طی زمان، عواملی به مثابه توسعه‌گران، معماران، برنامه‌ریزان، شهرسازان و سیاست‌گذاران محلی به‌عنوان عوامل تغییر غیرمستقیم نقش دارند و برنامه‌ها به‌عنوان فرایند تغییر شهری در شهرسازی مدرن مطرح می‌شوند. اما با نقد جریان مدرن، عواملی همچون امر اجتماعی، خواست‌ها، پسندها و آرمان‌های مردم، عوامل اقتصادی و غیره، نیز در مورفولوژی شهری مورد توجه قرار گرفته‌اند.

براساس اندیشه متفکران حوزه مورفولوژی شهری در دهه‌های اخیر و در مکاتب مختلف، ابعاد مورفولوژی شهری در رابطه متقابل بین توده و فضای باز و همچنین ساختار و نظام ارتباطی شبکه معابر مورد بررسی قرار گرفته است که می‌توان برپایه (جدول ۱))، با پژوهش دقیق به این موضوع نگاه داشت. همچنین در همین راستا می‌توان از دگرگونی‌های متحول محیطی در تعامل با ابعاد و نگرش‌های مورد واکاوی، مشخصه‌های زیر به‌عنوان یک مدل مفهومی پژوهشی در مورفولوژی شهری معرفی شود.

جدول (۱): فرایند مورفولوژی شهری-عوامل محیط (۳۲)

اطلاعات ورودی: واگردها-فاکتورها-مسیرها	پارامترهای مورفولوژی شهری		مشخصه‌های واکاوی		نتایج اعلام‌شده: نتایج، معیارها، پیشنهادها
	جابه‌های ساختمانی	ساختار شهری	انواع ساختمان‌ها	مساحت و شکل‌بندی قطعات زمین	
	شکل و ساختار شبکه معابر	نظم و ترتیب توده‌ها و بلوک‌ها	انواع ساختمان‌ها	جهت‌گیری ساختارها	
	← علوم اجتماعی	← زمانی	← ساختاری	نفوذ ساختمان‌ها به معابر	
	← روان‌شناسی انسان	← مکانی	← فیزیکی	ارتفاع ساختمان‌ها	
	← فرهنگ	← اقتصادی	← بوم‌شناختی	تراکم و تعداد طبقات	
	← تمدن	← سیاسی	← جوی	نسبت فضای باز به فضای بسته	
	نگرش‌ها		شناخت محیط	ارتباطات شبکه‌ای شهری	
			رفتارشناسی	ساختار و کیفیت فضاهای باز	
				نفوذپذیری بافت	

- چالش‌های پایداری شهری و اجتماعی

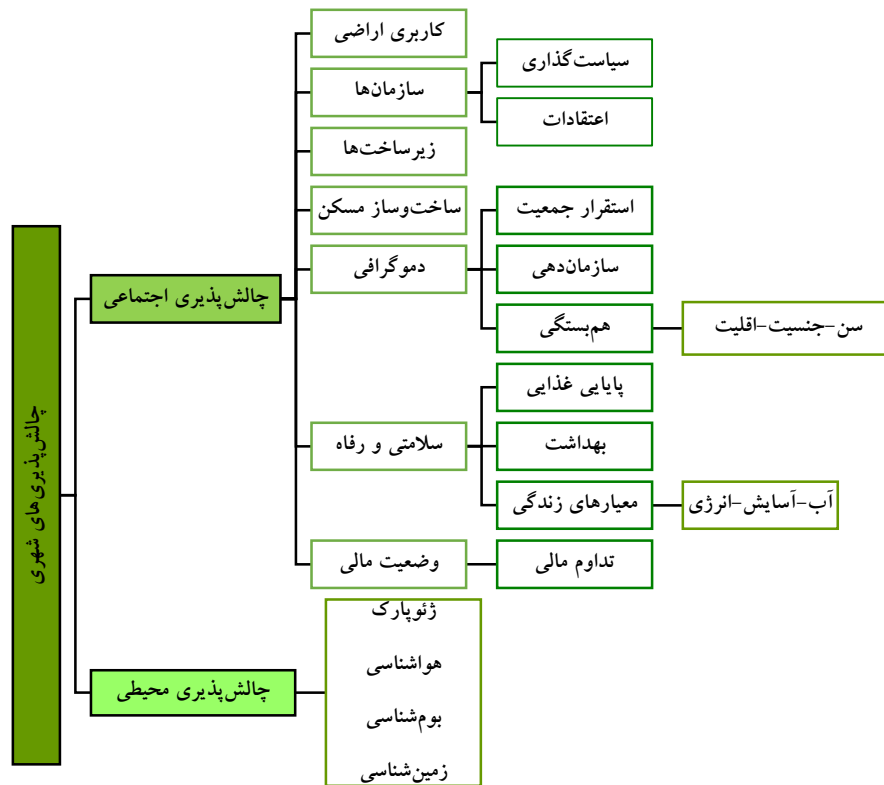
چالش‌پذیری به‌گشنگی هر سامانه نسبت به چالش‌ها اشاره دارد. در گام اول، این مفهوم به چالش‌های ناشی از رخدادهای طبیعی اختصاص داشته است، اما به مرور زمان در زمینه‌های گوناگون اعم از چالش‌های اجتماعی و اقتصادی، نظام‌های محیط زیستی و نگرش‌های جامعه به سمت توسعه پایدار گسترش یافته است. در حوزه شهرسازی، چالش‌های پایداری شهری مفهومی نسبتاً نو است که به مفهوم حوادث شهری نزدیک می‌شود. ویژگی‌های زندگی شهری، به ویژه در میان اقشار ضعیف اقتصادی، موجب افزایش چالش‌پذیری‌های شهری شده است که این امر مطالعات بسیاری را بر روی بافت‌های شهری متمرکز کرده است. به موازات آن، تغییرات آب و هوایی نیز فشارهای مضاعفی بر این اقشار وارد کرده است. چالش‌های پایداری شهری به‌عنوان ظرفیت مقابله با سویه‌های گسترده اختلالات ناشی از عوامل گوناگون طبیعی و انسانی، داخلی و خارجی تعریف می‌شود. این مفهوم شامل چالش‌پذیری‌های منابع، زیست‌محیطی، اقتصادی، اجتماعی در بافت شهری و غیره است (۳۳). با نگرش به مطالعات صورت گرفته،

چالش‌های پایداری شهری را می‌توان در ۲ بُعد محیطی و اجتماعی دسته‌بندی کرد. چالش‌پذیری محیطی؛ به ظرفیت مقابله با دشواری‌های طبیعی بیرونی می‌پردازد و چالش‌پذیری اجتماعی؛ توان مقاومت در برابر دشواری‌های ناشی از جامعه را ارزیابی می‌کند. تاب‌آوری جامعه بر نقش عوامل زمینه‌ای اجتماعی، سیاسی، اقتصادی و نهادی در مقیاس‌های مختلف مکانی و زمانی تأکید می‌کند. تاب‌آوری جامعه اغلب شامل سویه ظرفیت مقابله بوده و به سازگاری با محیط شهری تأکید دارد (۳۴). عواملی که بر تاب‌آوری جامعه تأثیر می‌گذارند، بسته به ظرفیت‌های مقابله یا سازگاری سامانه‌ها، می‌توانند چالش‌پذیری را کاهش یا افزایش دهند. در نتیجه، تاب‌آوری جامعه را می‌توان به عنوان بُعد انسانی چالش‌پذیری شهری در نظر گرفت، به همان شیوه‌ای که اشکال کلی‌تری از چالش‌پذیری را تشکیل می‌دهد (۳۵). به طور خاص، در تعریف جامع، چالش‌پذیری مستلزم یک رویکرد چند بُعدی است که تمامی عوامل استرس‌زا ناشی از خطرات بیوفیزیکی یا مرتبط با آب و هوا را علاوه بر موارد فوق در برگیرد.

به‌طورخاص، کاتر^۱ و همکاران عوامل تأثیرگذار بر تاب‌آوری جامعه را به ۵ گروه اصلی تقسیم نموده‌اند که عبارت‌اند از: ۱- ویژگی‌های جمعیتی، ۲- وضعیت اجتماعی-اقتصادی، ۳- کیفیت و شرایط مسکن، ۴- تراکم و پراکندگی سازه‌ها، و ۵- اتکاء به زیرساخت‌ها و دسترسی به خدمات اساسی (۳۶). بر باور محمد دبدبه/معمار دبدبه عواملی همچون اجزاء کاربری زمین، رشد و تراکم جمعیت، دسترسی به دارایی، مدیریت شهری و غیره، از عوامل تأثیرگذار و تأثیرپذیر در رابطه با چالش‌پذیری پایداری شهری قلمداد می‌شوند (۳۷). عوامل اجتماعی-اقتصادی، فردی-خانوادگی نیز از دیگر موارد مؤثر بر چالش‌پذیری عنوان می‌شوند. تعداد اعضای خانواده و درآمد آن‌ها نیز نقش مهمی در این بین دارد. خانواده‌های پرجمعیت با درآمد پایین بیشتر در معرض چالش‌های گوناگون قرار دارند و این وضعیت می‌تواند به کیفیت تحصیل کودکان نیز خدشه وارد نماید. از طرف دیگر، خانوارهای با درآمد بالا معمولاً دسترسی بهتری به منابعی اعم از غذا، آب، حمل و نقل و آموزش و غیره دارند (۳۸). در همین راستا، کیفیت مسکن می‌تواند از دیگر عوامل کلیدی در چالش‌پذیری شهری نقش داشته باشد. به‌عنوان نمونه کیفیت ساخت‌وساز، زیرساخت‌های مرتبط، موقعیت مسکن و مقررات ساختمانی و همچنین دسترسی به زمین‌های مقرون به‌صرفه و قابل دسترس، بر تاب‌آوری جامعه تأثیر می‌گذارند. خانواده‌های ثروتمندتر می‌توانند مسکن‌های باکیفیت‌تر و مقاوم‌تر در برابر خطرات

محیطی بسازند. اگر چه جمعیت فقیر به‌عنوان چالش‌پذیرترین گروه‌ها از نظر کیفیت ساخت و ساز شناخته می‌شوند. پژوهشگران بر آن باورند که به دلیل شبکه‌های اجتماعی قوی و تجربیات تاریخی‌شان، همیشه چالش‌پذیرترین گروه‌ها در مواجهه با خطرات نیستند. علاوه بر این، خانوارهای ثروتمند ممکن است بیشتر جذب مناطق ناپایدار محیطی به‌مثابه سواحل یا مناطق کوهستانی خوش آب و هوا که روی گسل‌های زلزله قرار دارند، شوند (۳۹). تبیین تراکم جمعیت نیز می‌تواند در افزایش چالش‌های اجتماعی نقش داشته باشد. به‌طوری‌که مناطق پرجمعیت معمولاً به دلیل تقاضای بالای زیرساخت‌ها خدمات مناسبی دارند، اما در مواقع اضطراری، ازدحام و ترافیک می‌تواند مانع تحرک سریع شود و تخلیه فوری را مشکل سازد، که این امر می‌تواند به کاهش کیفیت زندگی منجر شود (۴۰). در سطح کلان، عواملی به‌مثابه سیاست‌های کلان، ضوابط و مقررات و برنامه‌های نهادهای فرهنگی بر تاب‌آوری جامعه تأثیر می‌گذارند. ویژگی‌های فیزیکی محیط ساخته شده نیز مهم هستند. عوامل نهادی می‌توانند توانایی جوامع را برای سازگاری و مقابله با بحران‌ها تقویت کنند و یا برعکس، چالش‌پذیری و ناتوانی را در مواجهه با بحران‌ها افزایش دهند (۴۱). در نتیجه می‌توان ادعان داشت که ارتباط مابین چالش‌پذیری پایدار شهری و چالش‌های اجتماعی-محیطی می‌تواند به عوامل بسیاری مرتبط باشد (شکل (۱)).

¹ Cutter



شکل (۱): ارتباط مابین چالش‌پذیری پایدار شهری و چالش‌های اجتماعی-محیطی (۳۲)

روش‌شناسی

پژوهش حاضر از نوع روش تحقیق کمی است و به‌طور خاص، به بررسی رابطه بین مورفولوژی شهری و تاب‌آوری جامعه در بافت شهری تاریخی کرمان می‌پردازد. طوری که این تحقیق از راهبرد پیمایشی برای جمع‌آوری اطلاعات استفاده کرده و جامعه آماری آن شامل ۳۸۸ نفر از ساکنان شهر کرمان است. انتخاب نمونه‌ها براساس روش نمونه‌گیری تصادفی انجام شده و با توجه به جدول مورگان، تعداد نمونه‌ها برای واکاوی مناسب تعیین گردید. به منظور جمع‌آوری داده‌ها، از پرسش‌نامه‌ای استاندارد شامل سؤالات مرتبط با ابعاد مختلف مورفولوژی شهری و تاب‌آوری‌های اجتماعی استفاده شده است. برای تجزیه و تحلیل داده‌ها از روش‌های آماری مختلف بهره برده شده و به‌منظور تبیین هم‌بستگی میان

پارامترها، از شیوه تحلیل پارامترهای اصلی (PCA)، در تحلیل عاملی اکتشافی (EFA)، استفاده شده است. همچنین به منظور ارزیابی پایایی پرسش‌نامه از آزمون آلفای کرونباخ، بهره‌گیری شده که مقدار آلفای به‌دست آمده (ضریب بار ۰/۹۳)، نشان‌دهنده پایایی بسیار خوب پرسش‌نامه است. بدین‌سان، برای سنجش کفایت نمونه، آزمون کفایت نمونه‌گیری کیزر - میر - اولکین (KMO)، به‌کار گرفته شده است که نتایج نشان‌دهنده کفایت داده‌ها برای تحلیل‌های آماری است. نوع‌آوری پژوهش در مقایسه با سایر مطالعات مشابه در این است که تمرکز خاص بر روی نقش مورفولوژی شهری در افزایش تاب‌آوری جامعه در بافت شهری تاریخی کرمان صورت گرفته است. در این تحقیق، به جای صرفاً توصیف وضعیت موجود، سعی شده است تا ارتباطات پیچیده بین ویژگی‌های

یابد. در نتیجه، این واریسی به‌ویژه در شهرهای تاریخی که بافت‌های ارزشمند و دارای هویت فرهنگی هستند، از چشم‌انداز شهروندان این مناطق انجام می‌شود. در نتیجه، هدف اصلی این پژوهش انعکاس به این پرسش است که چگونه هر یک از عوامل برنامه‌ریزی شهری و کاربری زمین می‌توانند در تقلیل تاب‌آوری جامعه در بافت شهری تاریخی کرمان نقش داشته باشند. ۲ پرسش اساسی که چارچوب این تحقیق را تبیین می‌سازد و ۲ فرضیه تحقیق در جدول (۲)، ارائه شده است.

شهری و تاب‌آوری جامعه با نمود اجتماعی شفاف‌سازی شود. این رویکرد تحقیقاتی، علاوه بر بررسی‌های گذشته، می‌تواند به سیاست‌گذاری‌های بهتر و برنامه‌ریزی مؤثرتر در زمینه مدیریت شهری و حفظ بافت‌های تاریخی کمک کند. در این راستا، از نرم‌افزارهای آماری معتبر برای تجزیه و تحلیل داده‌ها بهره جسته شده است. بدین ترتیب، این تبیین با استفاده از روش‌های کمی و ابزارهای آماری نوین، تلاش دارد تا به درک عمیق‌تری از تأثیرات مورفولوژیکی بر تاب‌آوری جامعه در اجتماع بافت‌های شهری دست

جدول (۲): واکاوی پرسش‌ها و فرضیات پژوهش

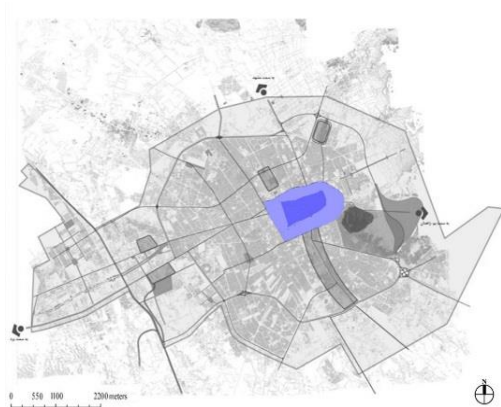
پرسش:

- ۱- چگونه می‌توان نقش برنامه‌ریزی شهری را در کاهش تاب‌آوری جامعه ارزیابی کرد؟
 - ۲- به چه صورت می‌توان عوامل مورفولوژی شهری در بافت شهری تاریخی کرمان را به منظور کاهش تاب‌آوری جامعه دسته‌بندی کرد، تا از این طریق به توسعه پایدار شهری و کاهش آلودگی‌های محیطی کمک گردد؟
- فرضیه:
- ۱- از دیدگاه ساکنان، مناطق شهری برنامه‌ریزی شده از نظر تاب‌آوری جامعه نسبت به مناطق غیررسمی، کم‌تر چالش‌پذیر هستند. برنامه‌ریزی شهری با بهبود زیرساخت‌ها و خدمات، می‌تواند تاب‌آوری جامعه را افزایش می‌دهد.
 - ۲- عوامل مورفولوژی شهری در بافت شهری تاریخی کرمان را می‌توان براساس تجربه زیسته ساکنان قدیمی دسته‌بندی کرد. این بافت تاریخی، با وجود چالش‌های مختلف، تاب‌آوری جامعه را نسبت به مناطق توسعه‌یافته برنامه‌ریزی شده، افزایش می‌دهد.

گستره واکاوی: بافت شهری تاریخی کرمان

بافت شهری تاریخی کرمان، مساحتی حدود ۶۰۰ هکتار را پوشش می‌دهد. به‌طور خاص، این بافت نقش مهمی در میراث فرهنگی ایران داشته و شامل ۲ بخش اصلی است: ۱- بخش مرکزی؛ که بازار بزرگ تاریخی کرمان و سایر امکانات تاریخی را در برمی‌گیرد. ۲- بخش پیرامونی؛ که شامل محلات قدیمی، مراکز محلی و بناهای تاریخی است. احیاء و حفظ زندگی شهری، به‌عنوان چالش اصلی، نیاز به تأمین خدمات شهری و امکانات متناسب با نیازهای امروزی می‌تواند داشته باشد (۴۱). برپایه (شکل ۲)، می‌توان به گستره بافت

شهری تاریخی کرمان و بخش مرکزی و پیرامونی اشاره نمود.



شکل (۲): گستره بافت شهری تاریخی کرمان و بخش مرکزی و پیرامونی

شبکه معابر نیز بیشترین دسترسی و نفوذ را از طریق کوچه‌های باریک و معابر فرعی درجه ۳ دارد، که ممکن است در شرایط بحرانی نظیر زلزله و آتش‌سوزی، خطرناک باشد. به‌طور ویژه، بافت شهری تاریخی کرمان با مسائل متعددی از جمله مسائل کالبدی، عملکردی، ترافیکی و محیطی روبه‌رو است، اما همچنین ظرفیت‌های بزرگی را برای استفاده از زمین به‌منظور اسکان، تجارت و خدمات شهری ارائه می‌دهد، همچنین می‌تواند بهبود شرایط محیط زیستی، زیست فرهنگی و حفظ ارزش‌های تاریخی را تسهیل کند.

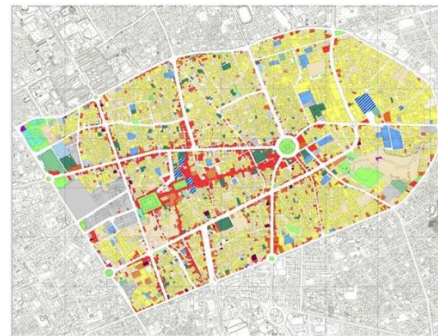
بر پایه طرح سامان‌دهی و به‌سازی بافت کهن کرمان مطابق با جدول (۳)، بدیهی است که کاربری مسکونی به‌طور چشم‌گیری بیشترین سطح را در این منطقه اشغال کرده است. پس از آن برحسب محور نقشه تراکم جمعیتی؛ کاربری تجاری به‌ویژه مغازه‌های مرتبط با بازار تاریخی کرمان، دارای مساحت قابل‌توجهی است. توزیع جمعیت در مناطق مختلف نیز ناهمگن است (با تراکم بالایی در برخی نقاط و کم‌تر در دیگر مناطق). محور نقشه تعداد طبقات؛ حاکی از آن است که ارتفاع طبقات اغلب ۱ یا ۲ طبقه بوده و به‌صورت پراکنده در نقاط مختلف قرار دارند. در آخر محور نقشه سلسله مراتب شبکه معابر سواره؛

جدول (۳): گستره محور نقشه واکاوی: بافت شهری تاریخی کرمان

محورهای نقشه بافت شهری تاریخی کرمان



محور نقشه تراکم جمعیتی



محور نقشه کاربری اراضی وضع موجود



محور نقشه سلسله مراتب شبکه معابر سواره



محور نقشه تعداد طبقات

شهر کرمان، مستلزم بررسی دقیق و عمیق خصایص آن‌ها می‌باشد که از اهمیت به‌سزایی برخوردار بوده

بررسی و تحلیل بافت‌های شهری تاریخی، به‌ویژه در شهرهایی با تاریخ غنی و تنوع فرهنگی همچون

مختلف بافت شهری می‌تواند به شناسایی الگوهای رفتاری و اجتماعی ساکنان کمک کند و در راستای حفاظت و توسعه پایدار این بافت‌ها راه‌گشا باشد. از این‌رو، بر پایه (جدول (۴))، به تفکیک و تحلیل ویژگی‌های بافت شهری تاریخی کرمان پرداخته و اطلاعات لازم در این زمینه ارائه شده است.

است. این بافت‌ها نه تنها نشان‌دهنده هویت و تاریخ اجتماعی - فرهنگی یک سرزمین هستند، بلکه به عنوان فضاهای با تعامل اجتماعی و اقتصادی نیز عمل می‌کنند. برای درک بهتری از این فضاها و شناخت عمیق‌تر از ویژگی‌های آن‌ها، نیاز است که اطلاعات کامل‌تری در مورد خصایص مورد مطالعه ارائه شود. بررسی تشابهات و تفاوت‌های موجود بین اجزای

جدول (۴): تحلیل و بررسی خصایص-گستره واکاوی: بافت شهری تاریخی کرمان (۴۲)

با توجه به تاریخچه و فرهنگ کهن شهر کرمان، این بافت دارای خصایص خاصی است که آن را از سایر بافت‌های شهری متمایز می‌سازد. از جمله مهمترین ویژگی‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

گستره واکاوی: بافت شهری تاریخی کرمان

تنوع معماری	<ul style="list-style-type: none"> این بافت شامل سبک‌های مختلف معماری است که تحت تأثیر شرایط جغرافیایی و فرهنگی منطقه قرار دارد. استفاده از مصالح محلی و طراحی متناسب با اقلیم در ساختمان‌ها از ویژگی‌های بارز این بافت است. 	خصایص مورد پژوهی
ساختار اجتماعی	<ul style="list-style-type: none"> بافت شهری تاریخی کرمان به دلیل تاریخ طولانی خود، ساختار اجتماعی خاصی را به نمایش می‌گذارد که ناشی از تعاملات فرهنگی، اقتصادی، سیاسی و اجتماعی ساکنان آن است. 	

به منظور درک بهتر از بافت شهری تاریخی کرمان، بررسی تشابهات و تفاوت‌های موجود بین بخش‌های مختلف آن ضروری است:

تشابهات	<ul style="list-style-type: none"> استفاده از مصالح بومی و طراحی‌های مشابه در بیشتر بناها وجود فضاهای عمومی که به عنوان نقاط کانونی تعاملات اجتماعی عمل می‌کنند. 	تشابهات و تفاوت‌ها
تفاوت‌ها	<ul style="list-style-type: none"> تنوع در اندازه و نوع کاربری بناها؛ برای مثال، بناهای تجاری معمولاً بزرگتر و با تراکم بناهای مسکونی هستند. تأثیرات مختلف فرهنگی و تاریخی بر طراحی و کاربری بناها که باعث ایجاد تنوع در الگوهای ساختاری شده است. 	

❖ تحلیل و بررسی ژرف‌نگرانه خصایص بافت شهری تاریخی کرمان و درک پژوهشگر بهتر از تشابهات و تفاوت‌های موجود در آن می‌تواند به حفاظت و نگهداری بهتر از این بافت کمک کند. به‌علاوه، شناسایی دقیق‌تر این ویژگی‌ها می‌تواند مبنایی برای برنامه‌ریزی‌های شهری و بهبود کیفیت زندگی ساکنان فراهم آورد.

۳ دسته از عوامل مطرح شده: ۱- «عوامل ثابت در وضعیت کنونی»، ۲- «عوامل چالش‌زا»، و ۳- «عوامل بی‌تفاوت»، عنوان کرد. همچنین گُش‌های چالش‌پذیری بافت شهری تاریخی کرمان را می‌توان بر پایه جدول (۵)، لحاظ کرد که هریک از پارامترهای انتخابی به‌صورت اختصاری دارای بیشترین اهمیت را

واکاوی بحث و تحلیل؛ پژوهش

به‌طورخاص، برپایه جدول (۱)، فهرستی از پارامترهای مورفولوژی شهری استحصال شده برای واکاوی تاب‌آوری جامعه بافت شهری تاریخی از طریق داده‌های پیمایشی در پیشینه پژوهش موردتبین، آورده شده است. طوری که این پارامترها را می‌توان به

در واکاوی بحث و تحلیل؛ پژوهش داشته‌اند. طوری‌که سوییۀ کُنش‌های انتخابی و پارامتر مطرح شده ساختارپذیرترین کُنش تأثیرگذار است. بدین‌سان که بتوان در طرح‌ریزی‌های مورفولوژی شهری برای هریک قوانین، ضوابط یا روایی را تبیین نمود. در ادامه تبیین آزمون فرضیه‌های بحث‌شده مبنی بر وجه ممیز ناحیه و بررسی پارامترها، ابتدا بخشی از حالات

ساختاری تأثیرگذار مورد‌ارسی عنوان، طوری‌که به‌جهت اطلاعات مرتبط با منطقه مورد‌مطالعه اعم از توزیع کیفیت ابنیه؛ ارتفاع طبقات؛ نسبت درصد کاربری‌های غیرمسکونی و دسترسی به مراکز درمانی؛ در گسترۀ طرح سامان‌دهی و به‌سازی بافت کهن کرمان می‌توان بر پایه جدول (۶)، مدنظر گرفت.

جدول (۵): پارامترهای چالش‌پذیری مورفولوژی شهری-گسترۀ واکاوی: بافت شهری تاریخی کرمان

کُنش	واژه انحصاری	پارامتر	استیباط نگارندگان
نفوذپذیری شهری	P1	اندازه‌گیری دسترسی سواره	امداد و نجات در بحران‌ات
	P2	اندازه‌گیری دسترسی پیاده	
	P3	گذرگاه‌های بن‌بست	
	D1	کیفیت ساختمان‌ها	
	D2	ارتفاع طبقات	
	D3	مساحت زمین‌ها	
	D4	شکل و ترتیب فضاها	
D5	اندازه ساختمان‌ها نسبت به راه‌ها		
D6	ساختمان‌های متروکه و ویران		
D7	تبیین فضاهای باز و بسته		
D7	تراکم جمعیت	تأثیر عوامل انسانی بر چالش‌پذیری	
PI2	میانگین سن ساکنان		
مشارکت شهروندان	NS1	پیوند هم‌بستگی مسکونی	مشارکت مردمی در برنامه‌ریزی بحرانی
	NS2	سلسله مراتب فضایی محله	
خدمات عمومی	SS1	محورهای فضاهای درمانی	اسکان موقت در حل بحران
	SS2	محورهای فضاهای عمومی	
کاربری اراضی	LU1	تراکم کاربری‌های پرجمعیت	فعالیت‌ها و چالش‌پذیری‌ها
	LU2	محورهای فضاهای باز	
سیاست‌های زیست‌محیطی	PO1	طرح‌ریزی خدمات شهری	سیاست‌های کاهش چالش‌های اجتماعی
	PO2	سامان‌دهی محورهای بافت تاریخی	
	PO3	تبیین فرایندهای آموزشی	
	PO4	برنامه‌های ساختاری متناسب با چالش	

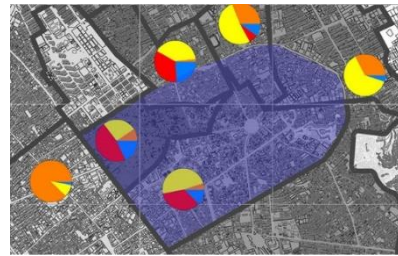
جدول (۶): موقعیت محورهای موردواکاوی نقشه بافت شهری تاریخی کرمان

موقعیت محورهای نقشه بافت شهری تاریخی کرمان در محدوده موردواکاوی



ارتفاع طبقات

وضعیت گستره: قیروزه‌ای: طبقه - آبی: ۲ طبقه - سرخابی: ۳ طبقه - زرد: سایر



توزیع کیفیت ابنیه

وضعیت گستره: زرد: مرمتی - قرمز: تخریبی - نارنجی: خوب - نیلی: سایر



نسبت درصد کاربری‌های غیرمسکونی

وضعیت گستره: کهربایی باز: مسکونی - نارنجی: مسکونی و فعالیت - قرمز: تجاری - آبی: آموزشی - زرد: زمین بایر - طوسی: اداری - مشکی: سایر



دسترسی به مراکز درمانی

وضعیت گستره: ■ بیمارستان - ■ درمانگاه

این وضعیت می‌تواند در زمان وقوع حوادثی نظیر زلزله یا آتش‌سوزی به کاهش چالش‌های اجتماعی کمک کند. با این حال، دسترسی به مراکز درمانی در این بافت وضعیت مطلوبی ندارد. تنها ۴ بیمارستان و ۴ درمانگاه در این منطقه وجود دارند. پراکندگی این مراکز به‌گونه‌ای است که برخی نواحی، به‌ویژه در شرق، خارج از محدوده دسترسی استاندارد قرار دارند که این موضوع چالش‌پذیر، بحران را افزایش می‌دهد. در واکاوی نسبت درصد کاربری‌های غیرمسکونی؛ نقشه‌های کاربری نشان می‌دهد که بیشترین سهم به کاربری‌های مسکونی اختصاص دارد و پس از آن کاربری‌های تجاری قرار می‌گیرند. این موضوع به‌دلیل وجود بازار تاریخی کرمان و فضاهای مرتبط با آن

در توزیع کیفیت ابنیه؛ گستره نقشه بافت شهری تاریخی کرمان نشان می‌دهد که ساختمان‌های تخریبی بخش قابل توجهی از این منطقه را تشکیل می‌دهند. در برخی مناطق، تقریباً ۵۰٪ و در بخش‌های دیگر در حدود ۳۵٪ از ساختمان‌ها در وضعیت تخریبی قرار دارند که این موضوع به‌طور قابل توجهی بر افزایش چالش‌های اجتماعی تأثیر دارد. بناهای مرمتی که شامل ساختمان‌های مرمت شده و نیازمند مرمت می‌شوند، گروه بعدی بزرگ را از نظر کیفیت تشکیل می‌دهند و این نیز به تشدید مشکلات اجتماعی کمک می‌کند. از نظر ارتفاع طبقات؛ در حدود ۷۰٪ از ساختمان‌ها ۱ طبقه هستند. با توجه به ساختار فشرده معابر و تراکم پایین انسانی که ناشی از ارتفاع کم ساختمان‌ها است،

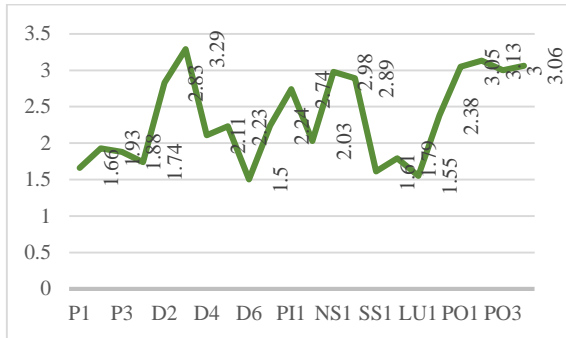
برای سنجش ارزیابی پاسخ‌ها، مقیاس لیکرت (روان‌سنجی) انتخاب شد و سؤالات به گونه‌ای تنظیم شدند که نمره میانگین کُتش چالش‌زا به سمت عدد ۱ و میانگین کُتش ضدچالش به سمت عدد ۵ است. بدین ترتیب، نمره بالاتر به معنای چالش کم‌تر یا نقش مؤثرتر در کاهش چالش‌پذیری است. به طوری که پارامترهای مورد تبیین امتیازهای حاصله برپایه جدول (۷)، بوده است.

است. به منظور هم‌بستگی بین پارامترها و آزمون فرضیه، هرکدام از کُتش‌های برپایه جدول (۵)، به صورت سؤال‌هایی در یک پرسش‌نامه طراحی و در میان افراد اجتماع پخش شد. اجتماع هدف شامل ساکنان بالای ۲۰ سال منطقه بافت شهری تاریخی کرمان بود که بیش از ۵ سال در این منطقه سکونت داشته‌اند. با توجه به گروه اجتماع هدف، (حجم نمونه)، براساس جدول مورگان، ۳۸۸ نفر تعیین شد.

جدول (۷): پارامترهای مورد تبیین امتیازهای حاصله در مورد تمام پارامترها

پارامترها	تعداد نمونه	کمینه (حداقل)	بیشینه (حداکثر)	میانگین	انحراف معیارها	واریانس
P1	۳۸۸	۱	۴	۱/۶۶	۰/۷۷۸	۰/۶۰۶
P2	۳۸۸	۱	۴	۱/۹۳	۰/۸۷۹	۰/۷۷۳
P3	۳۸۸	۱	۴	۱/۸۸	۰/۸۸۸	۰/۷۸۹
D1	۳۸۸	۱	4	۱/۷۴	۰/۸۱۷	۰/۶۶۷
D2	۳۸۸	۱	۵	۲/۸۳	۱/۱۳۶	۱/۲۹۰
D3	۳۸۸	۱	۵	۳/۲۹	۱/۲۰۰	۱/۴۴۱
D4	۳۸۸	۱	۵	۲/۱۱	۰/۹۸۴	۰/۹۶۹
D5	۳۸۸	۱	۵	۲/۲۳	۱/۰۷۵	۱/۱۵۵
D6	۳۸۸	۱	۳	۱/۵۰	۰/۶۳۰	۰/۳۹۷
D7	۳۸۸	۱	۵	۲/۲۴	۱/۰۶۶	۱/۱۳۷
PI1	۳۸۸	۱	۵	۲/۷۴	۱/۰۹۹	۱/۲۰۹
PI2	۳۸۸	۱	۵	۲/۰۳	۰/۹۳۲	۸۶۸۰
NS1	۳۸۸	۱	۵	/۹۸	۱/۱۹۷	۱/۴۳۳
NS2	۳۸۸	۱	۵	۲/۸۹	۱/۱۴۴	۱/۳۰۸
SS1	۳۸۸	۱	۴	۱/۶۱	۰/۷۵۶	۰/۵۷۲
SS2	۳۸۸	۱	۵	۱/۷۹	۰/۸۴۷	۰/۷۱۷
LU1	۳۸۸	۱	۳	۱/۵۵	۰/۶۴۵	۰/۴۱۶
LU2	۳۸۸	۱	۵	۲/۳۸	۱/۱۱۵	۱/۲۴۳
PO1	۳۸۸	۲	۵	۳/۰۵	۱/۱۰۱	۱/۲۱۱
PO2	۳۸۸	۲	۵	۳/۱۳	۱/۰۷۱	۱/۱۴۷
PO3	۳۸۸	۱	۵	۳/۰۰	۱/۱۰۷	۱/۲۲۵

پاسخ‌دهنده به تبیین طرح‌ریزی شهری به جهت کاستی چالش‌های اجتماعی تأیید و مناطق شهری سامان‌دهی شده را به نسبت مناطق دیگر پایدارتر عنوان می‌کنند.



شکل (۳): شدت تأثیر بر چالش‌های اجتماعی با واحد ضریب

برپایه شکل (۴)، حد وسط هم‌فزونی پارامترهای هرکدام از گُش‌های ۷ گانه را شامل بوده است. به‌طور خاص، گُش سیاست‌های زیست‌محیطی، با فزونی (ضریب بار ۳/۰۹)، بالاترین امتیاز را در جهت کاهش چالش‌های اجتماعی حصول نموده است. سپس گُش مشارکت شهروندان، با فزونی (ضریب بار ۲/۹۳)، بالاترین بخش را در رویارویی با چالش‌های اجتماعی به خود اختصاص داده است. بدین معنا بوده است که پیشینه سکنه و گُش هم‌بستگی همسایه‌ها با همدیگر به‌منظور گُش مؤثر به جهت پایداری اجتماعی به هنگام رویدادهای بد بررسی می‌گردد. گُش بعدی جمعیت و زیست‌محیط، با فزونی (ضریب بار ۲/۳۸)، تأثیری مستقیم بر کاهش چالش‌پذیری واقعیت‌ها از طریق تأثیرگذاری بر میانگین سنی ساکنان دارد. این ارتباط، نقشی اساسی در شکل‌گیری چگونگی مواجهه با چالش‌ها و رفع ضرورت‌ها ایفاء می‌کند. همچنین گُش نفوذپذیری شهری با فزونی بر (ضریب بار ۱/۸۲)، خدمات عمومی فزونی بر (ضریب بار ۱/۷۰)، و کاربری اراضی با فزونی بر (ضریب بار ۱/۹۶)، در

برای اطمینان از پایایی پرسش‌نامه ضریب آلفای کرونباخ محاسبه شد که عدد ضریب بار ۰/۹۳ را نشان داد. این مقدار حاکی از سازگاری درونی بالای پرسش‌نامه است. انتظار می‌رفت که هم‌بستگی معناداری میان پارامترها مشاهده شود. با این حال، تعداد زیاد و ماهیت متفاوت پارامترها، واکاوی رگرسیون همه آن‌ها را دشوار و تفسیر پارامترها را پیچیده می‌کرد. به‌منظور روشن‌سازی هم‌بستگی میان پارامترها، روش تحلیل پارامترهای اصلی (PCA)، در تحلیل عاملی اکتشافی (EFA)، به‌کار گرفته شد. برای سنجش کفایت حجم نمونه، آزمون کفایت نمونه‌گیری کیزر-میر-اولکین (KMO)، انجام شد که نتایج آن برپایه جدول (۸)، تبیین شده است. با توجه به مقدار آماره (ضریب بار ۰/۹۰۵)، حاصل از این آزمون، حجم نمونه برای تحلیل عاملی مناسب است.

جدول (۸): آزمون کفایت نمونه‌گیری کیزر-میر-اولکین

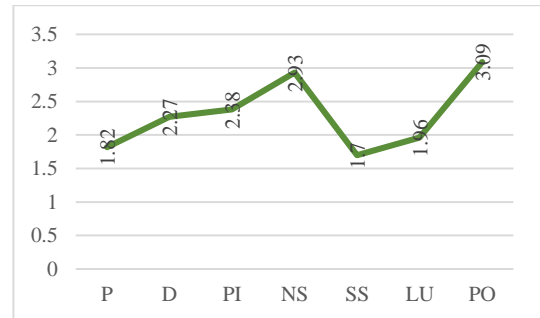
(KMO)	
شاخص کفایت: نمونه‌گیری کیزر-میر-اولکین	۰/۹۰۵
خی دو تقریبی	۱۲۷۳۴/۰۸۱
درجه آزادی	۲۳۱
آزمون: کرویت بارتلت	۰/۰۰۰
سطح معناداری	

برپایه شکل (۳)، میانگین بارهای ارزشی هر کدام از پارامترها است، طوری که پارامتر-D3: مساحت زمین‌ها در این ناحیه گُش تراکم محیطی از برجسته‌ترین انحطاط چالش‌های اجتماعی تلقی می‌شود. سپس ۴ پارامتر از گُش سیاست‌های زیست محیطی از جمله طرح‌ریزی خدمات شهری، سامان‌دهی محورهای بافت تاریخی، تبیین فرایندهای آموزشی و برنامه‌های ساختاری متناسب با چالش بالاترین بهره‌مندی را کسب نموده‌اند. به‌طور خاص،

رابطه با پارامترهای چالش‌پذیری مورفولوژی شهری گستره واکاوی: بافت شهری تاریخی کرمان در برابر چالش‌های اجتماعی تلقی می‌شود در اولویت‌های بعدی و مورد ارزیابی قرار می‌گیرند.

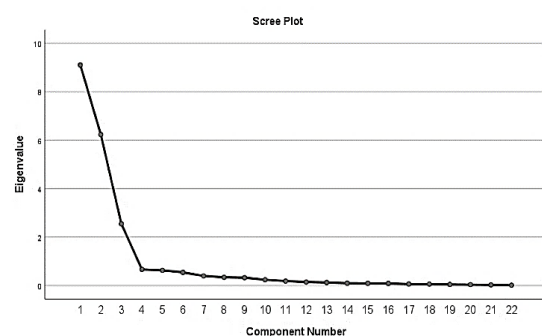
مطرح شده نقش داشته باشد. ماتریس پارامترهای متغیر یافته در جدول (۹)، ارایه شده است. ماتریس ذکر شده حاکی از آن است که پارامترهای کُنش سیاست‌های زیست‌محیطی؛ شامل طرح‌ریزی خدمات شهری، سامان‌دهی محورهای بافت تاریخی، تبیین فرایندهای آموزشی و برنامه‌های ساختاری متناسب با چالش هم‌سو با کُنش مشارکت شهروندان؛ به قرار پیوند هم‌بستگی مسکونی و سلسله مراتب فضایی محله همچین همگام با ۲ پارامتر از کُنش تراکم محیطی؛ از جمله ارتفاع طبقات، مساحت زمین‌ها در کنار کُنش جمعیت و محیط زیست؛ هم‌سو با تراکم جمعیت (در یک گروه)، عنوان می‌شوند. به گونه‌ای که هماهنگی میان عوامل، تصویری مثبت از فزونی پایداری در مواجهه با چالش‌های اجتماعی در بافت تاریخی شهر کرمان ارائه می‌دهد. پارامترهای کُنش خدمات عمومی به‌مثابه محورهای فضاهای درمانی و محورهای فضاهای عمومی با پارامترهای کُنش نفوذپذیری شهری؛ اعم از اندازه‌گیری دسترسی سواره، اندازه‌گیری دسترسی پیاده-هم‌سو با کُنش کاربری اراضی؛ تراکم کاربری‌های پرجمعیت-از کُنش پارامتر تراکم محیطی؛ کیفیت ساختمان‌ها و ساختمان‌های متروکه و ویران، اندازه‌گیری دسترسی سواره و پیاده در کنار تراکم کاربری‌های پرجمعیت، کیفیت ابنیه و بناهای متروکه و مخروبه (در گروه بعدی)، عوامل را تبیین می‌نمایند. طوری که بر حسب هویت آن‌ها و تأثیر فزونی بر چالش‌ها می‌توان آن‌ها را جزو عوامل چالش‌برانگیز در برابر چالش‌های اجتماعی عنوان نمود. در گروه آخر، از پارامترهای مختلفی مورد بررسی قرار گرفتند: از جمله کُنش تراکم محیطی؛ (به‌مثابه شکل و ترتیب فضاها، نسبت اندازه

رابطه با پارامترهای چالش‌پذیری مورفولوژی شهری گستره واکاوی: بافت شهری تاریخی کرمان در برابر چالش‌های اجتماعی تلقی می‌شود در اولویت‌های بعدی و مورد ارزیابی قرار می‌گیرند.



شکل (۴): درجه فزونی مورفولوژیک با واحد ضریب

برحسب پارامترهای مطرح، وجوه مشترک تعدادی از مشخصه‌ها به‌مثابه جنبه اجتماعی، اندازه‌های هر کدام از پارامترها در تحلیل عاملی اکتشافی مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. به‌طور خاص، اندازه خاص پارامترها در نمودار اسکری پلات، برپایه شکل (۵)، حاکی از آن است که از کُنش ۴، اندازه مختص زیر عدد ۱ کاهش می‌یابد. در نتیجه، پارامترها را می‌توان در ۳ کُنش پایه عنوان کرد.



شکل (۵): تبیین فرایند اسکری پلات اندازه‌ها در رابطه با

پارامترهای مورد واکاوی پژوهش

سپس ماتریس پارامترهای متغیر استخراج شد تا مشخص شود هر یک از متغیرها چگونه می‌تواند در گسترش دامنه کنش‌های مرتبط با عوامل سه گانه

نتیجه‌گیری

این پژوهش بر پایه ۲ فرضیه مرتبط با تقلیل چالش‌های اجتماعی در بافت شهری تاریخی کرمان انجام شده است. فرضیه اول این است که برنامه‌ریزی شهری با تکیه بر پارامترهای مورفولوژی شهری در بافت‌های تاریخی، می‌تواند به کاهش چالش‌های تاب‌آوری اجتماعی منجر شود. فرضیه دوم این است که پارامترهای تأثیرگذار، قابل ارزیابی و دسته‌بندی در گروه‌های کلی‌تر هستند که اولویت‌های برنامه‌ریزی را در ۳ دسته «عوامل ثابت در وضعیت کنونی»، «عوامل چالش‌زا» و «عوامل بی‌تفاوت»، نشان می‌دهند و می‌توان سهم هر یک از عوامل را در برنامه‌ریزی مشخص کرد. در این پژوهش، دسته‌بندی‌های به دست آمده از تحلیل عاملی اکتشافی به‌قرار زیر می‌باشد:

- عوامل ثابت در وضعیت کنونی: طرح‌ریزی خدمات شهری، سامان‌دهی محورهای بافت تاریخی، تبیین فرایندهای آموزشی و برنامه‌های ساختاری متناسب با چالش، پیوند هم‌بستگی مسکونی و سلسله مراتب فضایی محله، ارتفاع طبقات و مساحت زمین‌ها. تراکم جمعیت.

- عوامل چالش‌زا: محورهای فضاهای باز، محورهای فضاهای عمومی، اندازه‌گیری دسترسی سواره و پیاده، تراکم کاربری‌های پرجمعیت، کیفیت ساختمان‌ها، ساختمان‌های متروکه و ویران.

- عوامل بی‌تفاوت: شکل و ترتیب فضاها، اندازه ساختمان‌ها نسبت به راه‌ها، تبیین فضاهای باز و بسته، میانگین سن ساکنان، گذرگاه‌های بن‌بست.

بافت شهری تاریخی کرمان، تحت تأثیر توسعه مدرن، با مشکلات جدی خانه‌های متروکه و مخروبه روبه‌رو است که منجر به افزایش چالش‌های اجتماعی

ساختمان‌ها به راه‌ها، و تعریف فضاهای باز و بسته)، گنش کاربری اراضی؛ (به‌مثابه محورهای فضاهای باز)، گنش جمعیت و محیط‌زیست؛ (به‌مثابه میانگین سن ساکنان)، گنش نفوذپذیری شهری؛ (به‌مثابه گذرگاه‌های بن‌بست)، این پارامترها در راستای یکدیگر بررسی و تحلیل شدند. در نتیجه می‌توان گفت، این پارامترها نه به‌طور قطع مثبت هستند و نه منفی. در واقع، این پارامترها بسته به شرایط می‌توانند تأثیرات متفاوتی داشته باشند و هم به‌صورت مثبت و هم منفی عمل کنند. از این‌رو، برنامه‌ریزی برای بهره‌گیری از آن‌ها به شیوه‌ای که نتایج مثبتی به‌همراه داشته باشد، بسیار مهم است.

جدول (۹): ماتریس پارامترهای متغیر یافته در واکاوی گنش

پارامترها	گنش		
	۱	۲	۳
NS1	۰/۹۷۱		
PO1	۰/۹۶۸		
PO2	۰/۴۹۴		
PO3	۰/۹۴۷		
NS2	۰/۹۴۰		
PO4	۰/۹۳۰		
D2	۰/۹۱۸		
PI1	۰/۸۵۵		
D3	۰/۶۲۹		
SS1		۰/۹۳۲	
P1		۰/۹۲۶	
LU1		۰/۹۰۵	
D1		۰/۸۶۶	
D6		۰/۷۸۱	
SS2		۰/۷۲۹	
P2		۰/۶۶۴	۰/۴۶۸
D5			۰/۹۲۱
D4			۰/۹۱۸
D7			۰/۸۹۲
LU2			۰/۸۵۹
PI2			۰/۸۵
P3		۰/۶۰۰	۰/۶۲۰

شده است. این وضعیت باعث افزایش احتمال وقوع جرم و جنایت، تجمع افراد خلاف‌کار، معتاد و افزایش احساس ناامنی در میان شهروندان، به‌خصوص زنان و کودکان شده است. این شرایط چالش‌زا، همراه با کُنش نفوذپذیری شهری، نیازمند تدوین یک طرح جامع برای بازآفرینی یا بازسازی بناهای متروکه و مخروبه است. علاوه بر این، تهیه برنامه‌های کاربردی و دقیق بر اساس واقعیت‌های تراکم محیطی برای افزایش سطح نفوذپذیری شهری از سطح زمین، زیرزمین و آسمان باید در اولویت قرار گیرد. تدوین نظام جامع برای ارتقای کیفیت ساختمان‌ها نیز در این حین اهمیت زیادی دارد. تغییر کاربری‌های مناسب، با تغییر بناهای تاریخی از کاربری مسکونی به کاربری‌های گردشگری، می‌تواند به کاهش چالش‌های اجتماعی کمک کند. همچنین برنامه‌ریزی برای ساخت مراکز درمانی بیمارستانی و درمانگاهی، مراکز اسکان موقت پایدار و مراکز مدیریت بحران برای تقویت آمادگی و امدادسانی در شرایط وقوع حوادث طبیعی در این بافت باید در اولویت باشد. حفظ ساختار محلی و طراحی فضاهای جمعی محلی در برنامه‌های توسعه‌ی نو باید مدنظر قرار گیرد، زیرا آشنایی ساکنان با یکدیگر، بنابه گفته‌ی پاسخ‌دهندگان، یکی از عوامل مهم در کمک‌رسانی افراد به یکدیگر در مواقع بروز حوادث است.

باتوجه به بررسی‌های انجام شده در این پژوهش، مشخص گردید که مورفولوژی شهری نقش به‌سزایی در افزایش تاب‌آوری جامعه و مدیریت پایدار توسعه‌ی شهری دارد. گستره‌ی مورد واکاوی بافت شهری تاریخی کرمان نشان داد که طراحی مناسب فضاهای شهری و حفظ و احیای ساختارهای تاریخی می‌تواند به تقویت

پیوستگی اجتماعی، بهبود شرایط زیست محیطی و افزایش پایداری اقتصادی منجر شود. به مثابه‌ی به‌کارگیری راهبردهای معمارانه و شهرسازی مناسب، می‌توان به بهینه‌سازی استفاده از منابع، کاهش آلودگی‌های محیطی و ارتقای کیفیت زندگی ساکنان دست یافت. بدین‌سان، این پژوهش بر اهمیت برنامه‌ریزی جامع و پایدار شهری تأکید دارد که بتواند هم‌سو با حفظ میراث فرهنگی و محیط زیست، توسعه‌ی متوازن و پایدار را فراهم سازد. همچنین می‌توان به این نکته تأکید کرد که نتایج مهمی که در این پژوهش به دست آمده است، می‌تواند در ارزیابی‌های کمی دیگری نیز، علی‌الخصوص در شهرها و بافت‌های تاریخی مشابه و در حال توسعه به مانند کرمان، ارزشمند باشد. سُوپه‌های ممکن برای مقابله با چالش‌های اجتماعی در شرایط همانند نیز ممکن است کارآمد باشد، که این امر نشان از اهمیت کاربردی و تعمیم‌پذیری نتایج این پژوهش دارد. در نتیجه، این تحقیق توانست با بررسی تأثیر عوامل مورفولوژی شهری بر تاب‌آوری جامعه در بافت شهری تاریخی کرمان با استفاده از روش تحقیق کمی، تبیینی مؤثر به وجود آورد. نتایج حاصل از تحلیل داده‌ها نشان می‌دهد که ویژگی‌های کالبدی و اجتماعی به‌طور مستقیم بر توانایی ساکنان در مقابله با چالش‌ها و بحران‌های شهری تأثیرگذار هستند. نتایج این جستار حاکی از آن است که طراحی بهینه‌ی فضاهای عمومی و کیفیت زیرساخت‌ها تأثیر معناداری بر تاب‌آوری اجتماعی و اقتصادی ساکنان دارند. این یافته‌ها به‌وضوح ارتباط میان عوامل کالبدی و اجتماعی و تاب‌آوری شهری را نشان می‌دهند. بدین‌ترتیب، تعاملات میان ابعاد کالبدی و اجتماعی بررسی و نشان داده شده است که این عوامل می‌توانند به تقویت

contribution of socio-environmental fragmentation: Theoretical and methodological pathways, *Progress in Human Geography*, 41, 408.

[7] Gauthiez, B., 2004, The history of urban morphology, *Urban Morphology*, 8, 71.

[8] Lawal, O., Arokoyu, S.B., 2015, Modelling social vulnerability in sub-Saharan West Africa using a geographical information system, *Jambá: Journal of Disaster Risk Studies*, 7, 155.

[9] Dabdabeh, M., 2021, Design based on human perception and behavior, 1st Edition, Tahangostar, pp. 11-55. (in Persian)

[10] Danesh Pajouh, H., Sadeghifam, O.N., 2020, Explanation of morphological approach to urban form in resilience thinking, *International Journal of Urban Management and Energy Sustainability*, 1(4), 91.

[11] Zarandian, N., Farzin, M.R., Shalbfian, A.A., 2022, Public-private partnership framework for historic buildings: A case study, *Quarterly Journal of Strategic Studies of Public Policy*, 11(41), 160. (in Persian)

[12] Malek Abbasi, S., Moradi Masihi, V., Behzadfar, M., Modiri, A., 2022, Explaining the spatial structure of urban neighborhoods; case study: Kerman city, *Armanshahr Architecture & Urban Development*, 15(39), 201. (in Persian)

[13] Anjomshoa, E., Ahmadian, R., Moradi Massihi, V., 2023, Explaining the pattern of tactical urban planning intervention in spaces related to the historical texture of Iranian cities (case study: pamanar neighborhood, urban historical texture of Kerman city), *Islamic Art*, 20(49), 54. (in Persian)

[14] Whitehand, J.W.R., Samuels, I., Conzen, M.P., 2009, Conzen, M.R.G. 1960: Alnwick, Northumberland: a study in town-plan analysis. Institute of British Geographers Publication 27. London: George Philip, *Progress in Human Geography*, 33(6), 859.

[15] Norberg-Schulz, C., 1979, Kahn, Heidegger and the language of architecture, *Oppositions*, 18, 29.

[16] Esmailpour Zanjani, N., Ziari, Y.A., Zarabadi, Z.S., Sabbaghi, H.R., 2021, Comparative study of energy role in urban morphology with an emphasis on the formation of spatial structure (case studies: Tehran and Berlin), *International Journal of Urban*

تاب‌آوری شهری کمک کنند. این رویکرد بر اهمیت توجه به تأثیرات اجتماعی در مطالعات پیشین پژوهش حاضر تأکید دارد. طوری که، نتایج تحقیق در بستر پژوهش‌های قبلی قرار گرفته و نشان می‌دهد که در نظر گرفتن عوامل مورفولوژیک و اجتماعی در برنامه‌ریزی شهری، می‌تواند کیفیت زندگی ساکنان را بهبود بخشد و تاب‌آوری آن‌ها را در برابر بحران‌ها افزایش دهد. کلام آخر، این مورد واکاوی می‌تواند به عنوان مبنایی برای تحقیقات آینده و سیاست‌گذاری‌های مؤثر در این زمینه مورد استفاده قرار گیرند.

تعارض منافع

نویسندگان هیچ‌گونه تعارض منافی برای اعلام ندارند.

منابع

[1] Zeng, X., Yu, Y., Yang, S., Lv, Y., Sarker, M.N.I., 2022, Urban resilience for urban sustainability: Concepts, dimensions, and perspectives, *Sustainability*, 14, 2481.

[2] Buzási, A., Csizovszky, A., 2022, Urban sustainability and resilience: What the literature tells us about "lock-ins"?, *Ambio*, 52, 616.

[3] Rausell-Köster, P., Ghirardi, S., Sanjuán, J., Molinari, F., Abril, B., 2022, Cultural experiences in the framework of "cultural cities": Measuring the socioeconomic impact of culture in urban performance, *City, Territory & Architecture*, 9, 40.

[4] Meimandi Parizi, S, Taleai, M., Sharifi, A., 2024, A spatial evaluation framework of urban physical resilience considering different phases of disaster risk management, *Natural Hazards*, 120, 13041.

[5] Datola, G., 2023, Implementing urban resilience in urban planning: A comprehensive framework for urban resilience evaluation, *Sustainable Cities and Society*, 98, 104821.

[6] Krellenberg, K., Welz, J., Link, F., Barth, K., 2017, Urban vulnerability and the

- [27] Hosseini, A., Pourahmad, A., Ziari, K.O., 2019, Analysis of urban spatial structure based on the spatial distribution of population in Tehran, a polycentric city morphological approach, *Geographical Planning of Space Quarterly Journal*, 8(30), 19. (in Persian)
- [28] Jamali, S., 2015, Evaluating the place of typomorphological approaches in urban development plans in Iran, case of Tabriz metropolis, *Arid Regions Geographic Studies*, 6(19), 85. (in Persian)
- [29] Oxford Dictionary of English, 2010, 3rd Edition, Oxford University Press, pp. 66-99.
- [30] Dovey, K., Ristic, M., 2017, Mapping urban assemblages: The production of spatial knowledge, *Journal of Urbanism: International Research on Placemaking and Urban Sustainability*, 10, 15.
- [31] Pour-Mohammadi, M.R., Sadr-Mosavi, M.S., Jamali, S., 2011, A review on urban morphology schools, *Arid Regions Geographic Studies*, 2(5), 1. (in Persian)
- [32] Dabdabeh, M., 2022, Handwritten notes from Dabdabeh's architectural works collection: (Analyzing the relationship between urban morphology and social resilience: A study of the historical fabric of Kerman), 1st Edition, Dabdabeh architect, pp. 105-150. (in Persian)
- [33] Kelman, I., Gaillard, J.C., Lewis, J., Mercer, J., 2016, Learning from the history of disaster vulnerability and resilience research and practice for climate change, *Natural Hazards*, 82, 129.
- [34] Tate, E., Asif Rahman, M., Emrich, C., Sampson, C.C., Flood exposure and social vulnerability in the United States, *Natural Hazards*, 106, 435.
- [35] Bhanjee, S., Zhang, S., 2021, Do urban planning and sprawl affect social vulnerability? An assessment of dar es salaam, *Development Southern Africa*, 38, 189.
- [36] Cutter, S.L., Boruff, B.J., Shirley, W.L., 2003, Social vulnerability to environmental hazards, *Social Science Quarterly*, 84, 242.
- [37] Dabdabeh, M., 2023, Handwritten notes from Dabdabeh's architectural works collection: (Explanation in the context of urban design: sustainable urban development), 2st Edition, Dabdabeh architect, pp. 50. (in Persian)
- Management and Energy Sustainability, 2(3), 45.
- [17] Scheer, B.C., Stanilov, K., 2004, Suburban form: An international perspective, 1st Edition, Routledge, pp. 53-98.
- [18] Alberti, M., 2005, The effects of urban patterns on ecosystem function, *International Regional Science Review*, 28, 168.
- [19] de Oliveira, V.M.A., 2016, Urban morphology: An introduction to the study of the physical form of cities, 1st Edition, Springer, pp. 5-15.
- [20] Gauthier, P., Gilliland, J., 2006, Mapping urban morphology: a classification scheme for interpreting contributions to the study of urban form, *Urban Morphology*, 10, 41.
- [21] Ilugbusi, B.S., Adisa, O., Obi, O.C., Awonuga, K.F., Adelekan, O.A., Asuzu, O.F., Ndubuisi, N.L., 2024, Urban resilience to climate change: a review of adaptation strategies and infrastructure innovations, *Ecofeminism and Climate Change*, 5, 18.
- [22] Heydari, A., Hataminejad, H., Zanganeh Sharaki, S., Pourahmad, A., Hosseini, A., 2024, Foresight and identification of regeneration scenarios of inefficient urban Textures (case study: Historical texture of Kerman city), *Urban Structure & Function Studies*, 11(39), 29.
- [23] Saraeei, M.H., Ghasemi, M., Rostamzadeh, M., 2023, Strategic assessment of reconstructing historical textures: A case study of district 2 of Kerman historical texture, *The Journal of Geographical Research on Desert Areas*, 11, 67.
- [24] Baghaee, M., Ziyari, Y., Zarabadi, Z.S.S., Majedi, H., 2021, Evaluation and explanation of sustainable urban design model in approach to density at the urban fabric (case study: Tehran City), *Quarterly of Geography & Regional Planning*, 11(44), 261. (in Persian)
- [25] Mahmoudzadeh, H., Derakhshany, K., Momeni, S., 2020, Modeling the effects of marginalization on the changes in Urmia city and predicting physical urban expansion using satellite images by 2032, *Human Geography Research Quarterly*, 51, 871. (in Persian)
- [26] Dadashpoor, H., Alidadi, M., 2018, Morphological analysis of population distribution in Tehran metropolitan region (TMR), *Human Geography Research Quarterly*, 50, 109. (in Persian)

- [38] Burki, T., 2022, Food security and nutrition in the world, *The Lancet Diabetes & Endocrinology*, 10, 622.
- [39] Darkoh, M.B.K., Rwomire, A., 2003, Human impact on environment and sustainable development in Africa, 1st Edition, Routledge, pp. 63-77.
- [40] Nazmfar, H., Shirzad, M., Ghanbari, A., 2024, Earthquake risk analysis on the context of informal settlements in Tabriz using WASPAS model and geographic information system (GIS), *Journal of Environmental Science Studies*, 8, 7526. (in Persian)
- [41] Fuchs, S., Karagiorgos, K., Kitikidou, K., Maris, F., Paparrizos, S., Thaler, T., 2017, Flood risk perception and adaptation capacity: A contribution to the socio-hydrology debate, *Hydrology and Earth System Sciences*, 21, 3183.
- [42] Dabdabeh, M., 2024, Handwritten notes from Dabdabeh's architectural works collection: (Historical urban fabric of Kerman & untold aspects of the human environment), 1st Edition, Dabdabeh architect, pp. 212-230. (in Persian)

“Research article”

Assessing the impact of urban morphology on community resilience in sustainable urban development: A case study of the historic urban fabric of Kerman

Mohammad Dabdabeh^{1*}, Yashar Gharachamani Asl², Amir Hossein Farahinia³

¹Architecture & Urban Planning Department, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran.

²Department of Architecture, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran.

³Architecture & Urban Planning Department, National University of Skills (NUS), Tehran, Iran.

*Corresponding author: mohammaddabdabeh@yahoo.com

(Received: 8 July 2024, Accepted: 4 November 2024)

Abstract

The physical expansion of a city, when not properly aligned with its natural and historical structures, can lead to failures in urban development processes, particularly in cities with distinctive natural features. Kerman, one of Iran's historical cities with a unique cultural identity, has not been immune to the damages caused by industrial and modern development. Physical and social vulnerabilities, such as urban expansion driven by capitalist and land-centric perspectives, the spread of new lifestyles with distinct values, neglect of natural structures and historical fabric as sustainable models, car-centric urban design, and scattered migration and growth, have propelled Kerman toward extensive challenges. This study specifically examines and evaluates community resilience through quantitative research, exploring how urban morphology influences the reduction of vulnerability in historical cities from the residents' perspective. The main research question is: How can urban morphological factors be classified to increase community resilience in the historical urban fabric of Kerman? To assess the research hypotheses, field data were collected through explanatory and dispersed survey strategies, utilizing 388 questionnaires. Data analysis was conducted using Exploratory Factor Analysis (EFA) to group factors. The findings indicate that the classification of urban morphological options in Kerman's historical fabric can be divided into three categories: "Constant Factors in the Current Situation," "Challenging Factors," and "Indifferent Factors." The challenging factors include healthcare facility axes (loading factor 0.932), vehicular access (loading factor 0.926), pedestrian access (loading factor 0.664), density of populous land uses (loading factor 0.905), building quality (loading factor 0.866), abandoned and dilapidated buildings (loading factor 0.781), and public space axes (loading factor 0.729). This study demonstrates that planning, principled management, and attention to sustainable patterns within the city's historical and natural fabric are key to reducing vulnerability and increasing urban resilience for effective urban development.

Conflict of interest: None declared.

Keywords: Urban development, Urban morphology, Sustainable pattern, Community resilience, Historical urban fabric of Kerman