

ارزیابی چرخه حیات سنتز کربن نیتريد گرافیتی با رویکرد استفاده در صنایع مستقر در حوضه خلیج فارس

نرگس مهبودی^۱؛ محسن نوروزی^{۲*}؛ هاجر آبیاری^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه علوم و فناوری زیستی، دانشکده علوم و فناوری نانو و زیستی، دانشگاه خلیج

فارس، بوشهر، ایران

۲- استادیار گروه علوم و فناوری زیستی، دانشکده علوم و فناوری نانو و زیستی، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران

۳- استادیار گروه محیط زیست، دانشکده شیلات و محیط زیست، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان،

گرگان، ایران

(تاریخ دریافت ۰۴/۱۵/۰۰- تاریخ پذیرش ۰۰/۱۱/۱۲)

چکیده:

استفاده از فتوکاتالیست‌ها به منظور حذف آلاینده‌ها به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد خود، در سال‌های اخیر مورد توجه محققان قرار گرفته است. کربن نیتريد گرافیتی ($g-C_3N_4$) از جمله به‌روزترین و کارآمدترین فتوکاتالیست‌های سازگار با محیط‌زیست است اما استفاده از ترکیبات نوآرا، بدون توجه به ارزیابی چرخه حیات آن‌ها منطبق بر نگرش توسعه پایدار نیست. در مطالعه حاضر برای نخستین بار ارزیابی چرخه حیات فتوکاتالیست $g-C_3N_4$ استفاده شده جهت گوگردزدایی پساب صنایع منطقه پارس جنوبی در سواحل خلیج فارس انجام شد. در این پژوهش جهت ویژه‌سازی مصرف آب از روش ReCiPe، محاسبه میزان مصرف انرژی از روش CED، محاسبه انتشار گازهای گلخانه‌ای از روش GGP و ردپای بوم‌شناسی از روش EP استفاده گردید. نتایج به‌دست آمده نشان داد که بیشترین تأثیر محیط‌زیستی سنتز $g-C_3N_4$ عمدتاً بر روی بوم‌سازگان‌های آبی و به‌ویژه بوم‌شناسی آب دریا و آب شیرین با مجموع ۰۶/۷۴٪ و در درجه دوم بر روی سمیت انسانی (۱۵/۰۶٪) است. آثار مخرب محیط‌زیستی به کمک بهره‌گیری از شاخص‌های نهایی نیز به ترتیب به‌صورت آسیب به منابع (۰۵/۶۳٪) < آسیب به سلامت انسان (۵۶/۳۴٪) < آسیب به بوم‌سازگان (۳۹/۰۲٪) برآورد گردید. آنالیز حساسیت نیز مصرف الکتریسته را به‌عنوان موثرترین پارامتر بروز آثار مخرب محیط‌زیستی تعیین نمود. بر اساس نتایج به‌دست آمده می‌توان بیان داشت که بهره‌گیری از انرژی‌های تجدیدپذیر و جایگزینی آن‌ها با منابع فسیلی، می‌تواند نقش موثری در کاهش پیامدهای محیط‌زیستی حاصل از سنتز $g-C_3N_4$ ایفا نماید. نتایج حاصل از این مطالعه می‌تواند به‌عنوان راهبردی مقدماتی در زمینه ارزیابی چرخه حیات ترکیبات نوآرا، پیش از کاربست بزرگ مقیاس آن‌ها استفاده شود.

کلید واژگان: ارزیابی چرخه حیات، کربن نیتريد گرافیتی، گازهای گلخانه‌ای، بوم‌شناسی دریایی، میزان تقاضای انرژی

۱. مقدمه

(Anba., 2017). لازم به ذکر است که سولفورزدایی از جمله موثرترین مکانیسم‌ها برای بهبود کیفیت محیط‌زیست و کاهش آلاینده‌های نفتی در محیط است (Wang *et al.*, 2018). از این‌رو جلوگیری از ورود این آلاینده‌ها به بوم‌سازگان‌های آبی می‌تواند نقش به‌سزایی در کاهش آلودگی محیط‌زیست داشته باشد. باید بیان نمود که بسیاری از آلاینده‌های موجود در طبیعت به روش‌های متعارف تصفیه‌زیستی قابل تجزیه نیستند که این خود لزوم استفاده از فرآیندهای به‌روزتر با کارایی بیشتر از قبیل فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته را آشکار می‌نماید. طی چند سال گذشته، فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته مانند فوتوکاتالیست‌ها به‌عنوان یک زمینه‌نوظهور تحقیقات علمی، با هدف تولید آب سالم و پاک به‌وجود آمده است. به‌طورکلی فرآیندهای اکسیداسیون پیشرفته شامل: فنتون H_2O_2/Fe^{2+} ، شبه‌فنتون H_2O_2/Fe^{3+} ، فوتوفنتون H_2O_2/Fe^{2+} ، $(Fe^{3+})/UV$ ، H_2O_2/Fe^{3+} -Oxalate، فوتوکاتالیست $Mn^{2+}/Oxalic\ acid/Ozone$ ، H_2O_2/UV و O_3/UV ، O_3/H_2O_2 ، $TiO_2/h\nu/O_2$ هستند (Serra *et al.*, 2011). از بین روش‌های ذکرشده، استفاده از فوتوکاتالیست‌ها به‌منظور حذف آلاینده‌ها به‌دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد خود در سال‌های اخیر بیش از سایر روش‌ها مورد توجه محققان قرار گرفته است.

از جمله به‌روزترین و کارآمدترین نوع فوتوکاتالیست‌های سازگار با محیط‌زیست، پلیمرکربن‌نیتريدگرافیتی ($g-C_3N_4$) است. این ترکیب، ساختاری شبیه به گرافن داشته اما برخلاف گرافن که منحصراً از اتم کربن ساخته شده است، در ساختار آن می‌توان تلفیقی از اتم‌های کربن، نیتروژن،

رشد سریع جمعیت همراه با شهرنشینی و گسترش فعالیت‌های صنعتی، دسترسی به آب آشامیدنی سالم را دشوار ساخته است. علی‌رغم اینکه ۷۰٪ سطح زمین توسط بوم‌سازگان‌های آبی احاطه شده است، تنها حدود ۰/۶۵ درصد از منابع آبی به‌طور مستقیم توسط انسان‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد (Oturán and Aaron, 2014). از آنجا که امروزه با مشکلات شدید کمبود آب مواجه هستیم، تصفیه‌ی پساب به‌عنوان یکی از راهکارهای مدیریت منابع آبی مورد توجه قرار گرفته است (Ioannou-Ttofa *et al.*, 2017).

یکی از مشکلات کنونی، پساب واحدهای گوگردزدایی است که مشکلات متعددی برای ساکنان و زیست‌مندان منطقه پارس جنوبی فراهم آورده است. ترکیبات گوگردی از جمله مشتقات نفتی است که در واحدهای مختلف مستقر در منطقه پارس جنوبی در حجم انبوه تولید و عمدتاً به‌صورت توده‌ای دپو می‌گردد. ترکیبات گوگردی انباشته در این منطقه، به سهولت در اثر شستشو و یا جریان‌های کوچک مقیاس باد به پهنه‌های آبی خلیج فارس واقع در مجاورت این مجتمع‌ها منتقل و آلودگی شدید این بوم‌سازگان‌ها را به‌همراه دارد. از این‌رو، با توجه به لزوم پیشگیری از آلاینده‌های حاصل از این ترکیبات، نیاز به تصمیم‌گیری اساسی، کارا و بهره‌گیری درست از آن‌ها ضروری بنظر می‌رسد.

با توجه به منابع آلاینده، روش‌های مختلف سولفورزدایی وجود دارد که شامل سولفورزدایی هیدرو، سولفورزدایی-اکسیداسیونی، سولفورزدایی زیستی، سولفورزدایی جذبی و سولفورزدایی استخراجی می‌باشند (Dehghan and

و هیدروژن را مشاهده نمود. همچنین، جذب نوری این فتوکاتالیست در محدوده مرئی و UV است. این قابلیت موجب می‌شود تا برخلاف سایر انواع فتوکاتالیست‌ها از قبیل ZnO و TiO₂ در ناحیه مرئی نیز فعال گردیده و بازدهی عملیاتی آن ارتقا یابد (Dong et al., 2014; Wen et al., 2017). از سویی، هزینه تولید آن در مقیاس واحد نسبت به فتوکاتالیست‌های مذکور پایین‌تر بوده که این خود، عامل مهمی در تشویق صاحبان صنایع به منظور بهره‌گیری از این فتوکاتالیست در تصفیه پساب محسوب می‌گردد. نکته قابل توجه در مورد g-C₃N₄ آن است که به علت پایداری شیمیایی و حرارتی بسیار بالا، در فاز سوسپانسیونی نیز نسبت به سایر انواع فتوکاتالیست‌ها از بازدهی حذف بالاتری برخوردار است (Ong et al., 2016). بر این اساس و با توجه به اختلاف سطوح انرژی در فتوکاتالیست g-C₃N₄، این فتوکاتالیست می‌تواند به‌عنوان جایگزینی مناسب برای سایر انواع فتوکاتالیست‌های نیمه‌رسانای فلزی محسوب می‌گردد. این امر سبب کاهش آثار مخرب محیط‌زیستی بهره‌گیری از این فتوکاتالیست در مقایسه با سایر انواع فتوکاتالیست‌ها، به دلیل عدم انتشار نامطلوب انواع فلزات در محیط می‌گردد (Zheng et al., 2012).

استفاده از ترکیبات نوآرا در حذف آلاینده‌های محیط‌زیست، بدون توجه به ارزیابی چرخه حیات آن‌ها و بررسی آثار و پیامدهای آن بر ارکان‌های مختلف محیط‌زیست، منطبق بر نگرش توسعه پایدار نبوده و این امر لزوم انجام مطالعاتی از این دست را نمایان می‌کند (Serra et al., 2011). از این‌رو، می‌توان بیان نمود که پیش از کاربست هر نوع فن‌آوری جدید در عرصه‌های مختلف محیط‌زیست و به‌منظور

کاستن و یا رفع آثار محیط‌زیستی این فن‌آوری‌ها، در کنار توجه به پتانسیل تجزیه‌کنندگی آلاینده‌ها توسط این ترکیبات نوآرا، باید در مورد فرآیندهای معدنی‌سازی و سمیت‌زدایی آن‌ها نیز ارزیابی جامع محیط‌زیستی صورت پذیرد (Rodríguez et al., 2016). در یک نگاه، مطالعه LCA حاصل از یک محصول شامل ۴ گام عمده است که به ترتیب شامل مراحل ذیل است: (۱) تعریف هدف و دامنه (۲) تجزیه و تحلیل سیاهه (۳) ارزیابی پیامدها و (۴) تفسیر نتایج است (Standardization, 2006a).

در مطالعه حاضر برای نخستین بار سعی بر آن است تا با تأمل بر ارزیابی چرخه حیات فتوکاتالیست g-C₃N₄ استفاده شده به‌منظور گوگردزدایی از پساب صنایع پارس جنوبی، طیف گسترده آثار و پیامدهای احتمالی حاصل از بهره‌گیری از این نوع فتوکاتالیست به‌منظور تصفیه پساب، از قبیل تغییرات اقلیمی، تخلیه آزون، سمیت انسانی، بوم‌شناسی آبریان آب شیرین، تشکیل اکسیدان فتوشیمیایی، تشکیل ذرات معلق، تشعشع یونیزه، اسیدی شدن، پرغذایی آب شیرین (یوتروفی)، پرغذایی دریایی، سمیت آبریان دریایی، اشغال زمین‌های کشاورزی، اشغال زمین‌های شهری، تبدیل زمین‌های طبیعی، تخلیه فلزی، تخلیه فسیلی، تخلیه آب و بوم‌شناسی خشکی مورد بررسی قرار گیرد، بیشترین آثار محیط‌زیستی حاصل از سنتز فتوکاتالیست با توجه به ۱۸ طبقه ذکر شده، مشخص و راهکارهای کاهش این آثار نامطلوب محیط‌زیستی ارائه گردد.

۲. مواد و روش‌ها

۱-۲. سنتز کربن نیتريد گرافیتی

برای سنتز g-C₃N₄، با توجه به احتمال استفاده و

حاضر "گهواره تا دروازه" بوده است، از این رو واحد عملیاتی مورد تاکید، می‌بایست بیشتر بر جنبه‌های سیاهه تولید و سنتز فتوکاتالیست تمرکز می‌داشت. از سویی قابلیت تکرارپذیری، مقایسه‌پذیری و صحت-سنجی نتایج مذکور توسط سایر پژوهشگران در مطالعات آتی، مهم‌ترین فاکتور مورد تامل در انتخاب واحد عملیاتی مذکور بوده است. با این پیش‌زمینه، مرزبندی فرآیند سنتز فتوکاتالیست $g-C_3N_4$ در شکل ۱ نشان داده شده است.

۲-۲-۲. سیاهه‌نویسی

مواد شیمیایی به کار رفته در سنتز $g-C_3N_4$ و مواد منتشر شده در حین فرآیند تولید، بر اساس واحد عملیاتی در جدول ۱ ارائه شده است. در این پژوهش سیاهه داده‌های مورد استفاده جهت ارزیابی چرخه حیات سنتز فتوکاتالیست $g-C_3N_4$ بر مبنای مطالعات آزمایشگاهی و انجام تست‌های مختلف طی اجزای متعدد گردآوری شد. همچنین، جهت برآورد دقیق پیامدهای مصرف انرژی و آب، پتانسیل سم‌شناسی بوم‌سازگانی و انسانی و نیز پیامد محیط‌زیستی ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای، از مرحله پیدایش تا مرحله استفاده از دستورالعمل استاندارد ISO 14040 و ISO 14044 تبعیت شد (Standardization, 2006a, b). این امر، به‌منظور پیروی از یک الگوی واحد، جهت مقایسه‌های آتی با سایر روش‌های تصفیه صورت پذیرفت.

۲-۲-۳. ارزیابی پیامدهای محیط زیستی

ارزیابی پیامدهای محیط‌زیستی ناشی از سنتز $g-C_3N_4$ با استفاده از روش ReCiPe انجام شد که پیامدها را در دو سطح میانی و پایانی ویژه‌سازی می‌نماید (Chen et al., 2017). همچنین برای محاسبه میزان مصرف انرژی از روش تقاضای انرژی

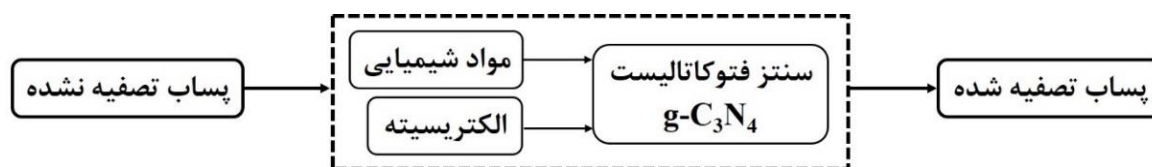
سنتز در مقیاس وسیع، از ماده ارزان قیمت اوره استفاده شد. در این روش، ۱۰ گرم پودر اوره را درون بوته چینی قرار داده و سپس درون یک کوره با نرخ افزایش دمای ۱۵ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه تا دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۴ ساعت قرار داده شد. پس از سرد شدن بوته چینی، پودر زردرنگ تشکیل شده جمع‌آوری گردید. کوره مورد استفاده در این مطالعه از نوع کوره Memmert ساخت کشور آلمان و با قابلیت ارتقای دمایی تا ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد را دارا بود.

۲-۲. مراحل انجام ارزیابی چرخه حیات

در پژوهش حاضر جهت ارزیابی چرخه حیات سنتز کربن نیتريد گرافیتی، مدیریت داده‌ها، و محاسبات از نرم افزار SimaPro نسخه ۹ استفاده شد. همچنین جهت ارزیابی پیامدهای چرخه حیات از پایگاه داده‌های موجود مانند Ecoinvent v.3.4 استفاده گردید. این پایگاه شامل داده‌های دریافتی از سازمان‌های مربوط بیش از ۲۵۹ کشور بوده که کشور ایران نیز در زمره همین کشورهاست و این داده‌ها به‌صورت سالیانه به‌روزآوری گردیده و از بالاترین درجه اعتبار برای بهره‌گیری در مقیاس ملی، منطقه-ای و بین‌المللی برخوردارند.

۲-۲-۱. تعریف هدف و دامنه

ساخت و مدل‌سازی یک فرآورده یا سیستم نیازمند تعیین واحد عملیاتی است که توصیف کمی از عملکرد یک محصول به‌شمار می‌آید و به‌عنوان مرجع برای همه محاسبات مربوط به ارزیابی اثر عمل می‌کند. واحد عملیاتی در این پژوهش، یعنی مبنای قیاس و ارائه نتایج، سنتز ۱۰ گرم فتوکاتالیست $g-C_3N_4$ جهت گوگردزایی پساب صنایع مستقر در منطقه پارس جنوبی بود. مقیاس مورد تامل در مطالعه



شکل ۱- مرز سیستم محصول مورد مطالعه در پژوهش حاضر

(Tabesh *et al.*, 2019; Corominas *et al.*, 2013). پیامدهای محیط‌زیستی در ۱۸ گروه پیامد در شاخص سطح میانی و ۳ دسته پیامد در شاخص سطح پایانی بررسی شدند.

۱-۳. پیامدهای محیط‌زیستی شاخص سطح میانی

با توجه به نتایج جدول ۲ پیامد بوم‌شناسی دریایی با ۴۲/۳۸٪ در رتبه اول دسته‌بندی اثرات محیط-زیستی مطالعه حاضر قرار گرفته است و به دنبال آن بوم‌شناسی آب شیرین با ۳۱/۶۸٪، پیامد سمیت انسانی با ۶/۱۵٪ و همچنین پیامد تخلیه فسیلی با ۶/۰۲٪ در رتبه‌های بعدی دسته‌بندی اثرات محیط‌زیستی قرار گرفته است.

۱-۱-۳. بوم‌شناسی دریایی

از عوامل موثر بر بوم‌شناسی دریا می‌توان به عناصر مس، وانادیوم، نیکل، برم، باریم، نقره، منگنز، و روی اشاره کرد که موجب ایجاد این پیامد محیط‌زیستی می‌شوند. ترتیب رتبه‌بندی فلزات با بیشترین تأثیرات به شرح زیر است: عنصر مس (۶۲/۰۷٪) < وانادیوم (۸/۳۵٪) < نیکل (۸/۷۱٪). با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان دریافت فرآیندهایی از جمله ضایعات مس تولیدی (۵۶/۲۵٪)، گاز طبیعی (۱۲/۰۸٪)، الکتریسیته (۱۰/۷۸٪) و پسماندهای سولفیدی (۵/۶٪) بر دسته بوم‌شناسی دریا نقش دارند (شکل ۲a).

۲-۱-۳. بوم‌شناسی آب شیرین

فلزات مس، برم، نیکل، نقره، باریم، منگنز، روی، و وانادیوم از جمله مواردی هستند که بر روی

تجمعی (CED) استفاده شد. از این روش جهت محاسبه مصرف مستقیم یا غیرمستقیم انرژی در طول چرخه حیات یک محصول یا خدمات استفاده می‌گردد (Frischknecht *et al.*, 2007). علاوه بر این، از روش GGP جهت برآورد انتشار کل گازهای گلخانه‌ای برای سیاهه محصول در واحد CO₂ eq استفاده شد که امکان تمایز بین چهار منبع مختلف انتشار گازهای گلخانه‌ای از منابع فسیلی، انتشار کربن بیوژنیک، ذخیره کربن، و انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از تغییر شکل زمین CO₂ eq را فراهم می‌کند (Zampori and Dotelli, 2014). مقدار انتشار آلاینده‌ها ناشی از فرایند تولید محصول و مقدار زمین اشغال شده نیز با استفاده از روش ردپای بوم‌شناسی (EF) مشخص گردید (Zadgaonkar and Mandavgane, 2020).

۳. نتایج

پیامدهای محیط‌زیستی سنتز g-C₃N₄ استفاده شده برای گوگردزایی پساب صنایع سنگین در منطقه ویژه انرژی اقتصادی پارس جنوبی در جدول ۲ نشان شده است. نتایج نشان می‌دهد که سنتز کربن نیتريد گرافیتی بیشترین تأثیر را روی پیامد بوم‌شناسی دریایی داشته است. از آنجا که مقیاس‌ها و واحدهای مورد استفاده برای هر دسته اثرات متفاوت است، از روی مشخصات محیطی ممکن است نتوان نتایج مطلوبی به دست آورد. از این‌رو، نرمال‌سازی داده‌ها امکان مقایسه همه اثرات محیط‌زیستی در یک مقیاس واحد را فراهم می‌کند

جدول ۱- سیاهه نویسی ارزیابی چرخه حیات سنتز کربن نیتريد گرافیتی در واحد عملیاتی (۱۰ g-C₃N₄)

پارامترها	واحدها	میزان
ورودی ها		
اوره	g	۲۸/۵۷
الکتریسیته	kWh	۵۴
گرما	kWh	۱/۳۳
مواد منتشره به هوا		
CO ₂	g	۲۰/۹۳
NH ₃	g	۲۴/۳۰۲
CHNO	g	۲۰/۴۶۸
H ₂ O	g	۵۱/۴۲

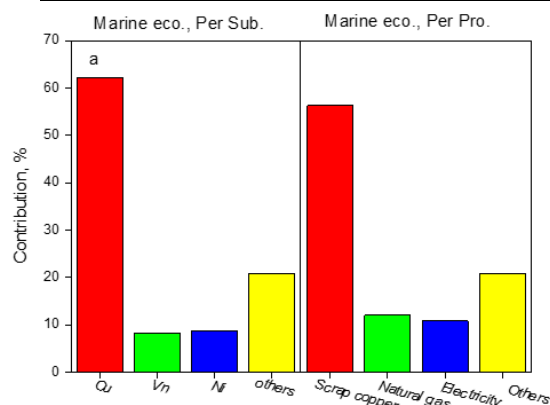
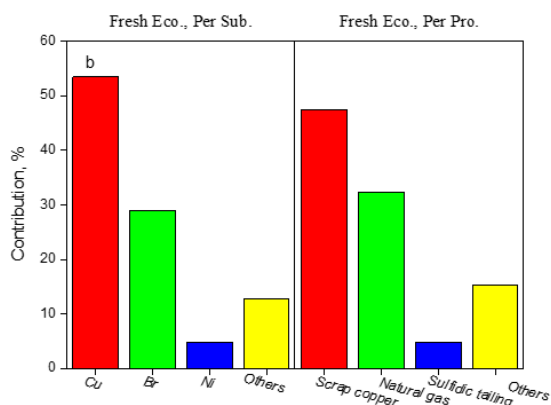
جدول ۲. اثرات محیط‌زیستی سنتز g-C₃N₄ و آنالیز حساسیت آنها بر حسب درصد

دسته‌بندی اثرات	واحد	داده های نرمالیز شده	آنالیز حساسیت(%) الکتریسیته
بوم‌شناسی دریایی	kg ۱,۴-DB eq	۰/۰۸۳	۱۶/۶۰
بوم‌شناسی آب شیرین	kg ۱,۴-DB eq	۰/۰۶۲	۱۶/۶۰
سمیت انسانی	kg ۱,۴-DB eq	۰/۰۱۲	۱۶/۵۳
تخلیه فسیلی	kg oil eq	۰/۰۱۲	۱۶/۵۹
تغییرات اقلیمی	kg CO ₂ eq	۰/۰۰۶	۱۶/۵۹
اسیدی شدن خشکی	kg SO ₂ eq	۰/۰۰۵	۱۲/۵۳
پرغذایی آب شیرین	kg P eq	۰/۰۰۴۹	۱۶/۴۸
تشکیل ذرات معلق	kg PM _{۱۰} eq	۰/۰۰۳۹	۱۴/۶۲
تشکیل اکسیدان فتوشیمیایی	kg NMVOC	۰/۰۰۱۸	۱۶/۶۲
تشعشع یونیزه	kBq U _{۲۳۵} eq	۰/۰۰۱	۱۶/۶۳
پرغذایی دریایی	kg N eq	۰/۰۰۰۱	۱۶/۱۶
تبدیل زمین‌های طبیعی	M ^r	۰/۰۰۰۸	۱۵/۹۴
تخلیه فلزی	kg Fe eq	۰/۰۰۰۸	۱۱/۷۶
بوم‌شناسی خشکی	kg ۱,۴-DB eq	۰/۰۰۰۶	۱۶/۵۸
تخلیه ازون	kg CFC-۱۱ eq	۰/۰۰۰۱	۱۶/۶۱
اشغال زمین‌های شهری	M ^r a	۶/۸۸E-۰۵	۱۶/۵۲
اشغال زمین‌های کشاورزی	M ^r a	۱/۰۴E-۰۵	۱۶/۱۸
تخلیه آب	M ^r	.	.

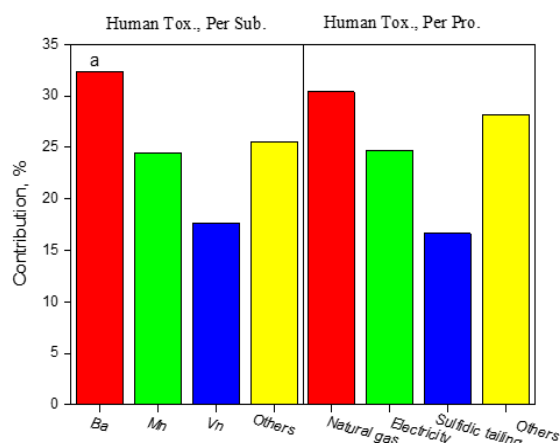
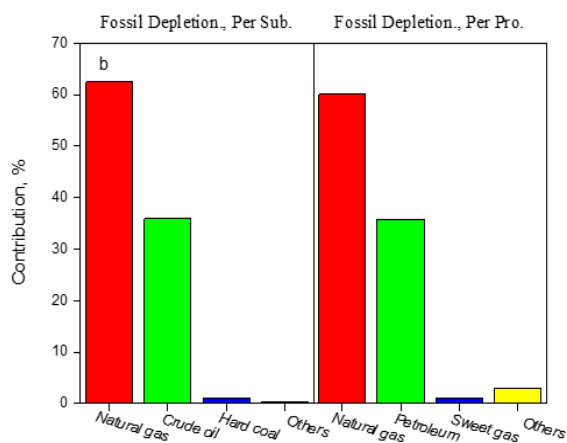
جمله عوامل مؤثر بر این دسته اثرات است که ضایعات مس با ۴۷/۵۱٪، بیشترین تاثیر را به خود اختصاص می‌دهد. گاز طبیعی و پسماندهای سولفیدی به ترتیب با ۳۲/۳۴٪ و ۴/۸۰٪، در رده‌های بعدی قرار دارند (شکل ۲b).

۳-۱-۳. سمیت انسانی

بوم‌شناسی آب شیرین تاثیر قابل توجهی دارند. ترتیب فلزات در این دسته‌بندی اثرات بدین صورت است: مس با ۵۳/۴۵٪ بیشترین تاثیر و سپس برم و نیکل به ترتیب با ۲۸/۹۹٪ و ۴/۸٪ در دسته‌های بعدی قرار می‌گیرند. نتایج نشان داد که فرآیندهای ضایعات مس، گاز طبیعی و پسماندهای سولفیدی از



شکل ۲- نمودار مواد و فرآیندهای مؤثر بر پیامد بوم‌شناسی دریایی (a) و بوم‌شناسی آب شیرین (b)



شکل ۳- نمودار مواد و فرآیندهای مؤثر بر پیامد سمیت انسانی (a) و پیامد تخلیه فسیلی (b)

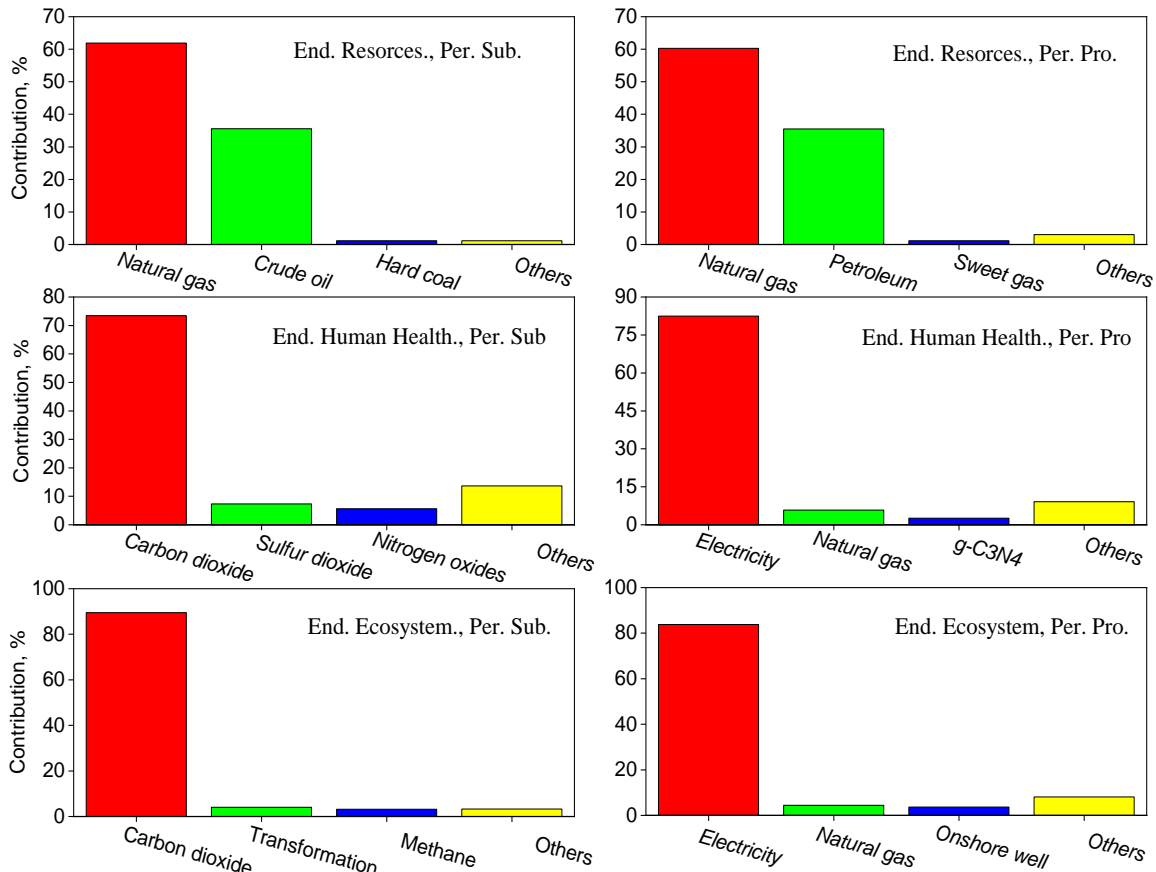
تخلیه فسیلی می‌شوند. ترتیب اثرگذاری این ترکیبات به شرح زیر است: گاز طبیعی (۶۲/۴۹٪) < ذغال سنگ (۳۵/۸۹٪). فرآیندهای مؤثر در این میان، شامل گاز طبیعی با ۶۰/۰۹٪ و نفت خام با ۳۵/۸۴٪ می‌باشند (شکل ۳b).

۳-۲. پیامدهای محیط‌زیستی شاخص سطح پایانی روش سطح پایانی اثرات محیط‌زیستی را در قالب ۳ دسته، آسیب به منابع (۶۳/۰۵٪)، آسیب به سلامت انسان (۳۴/۵۶٪) و آسیب به بوم‌سازگان (۲/۳۹٪) نشان داد. نتایج نشان داد که گاز طبیعی، نفت خام، ذغال سنگ سخت، ذغال سنگ قهوه‌ای و آهن از جمله موادی هستند که باعث ایجاد آسیب به منابع می‌شوند. در این میان گاز طبیعی با ۶۱/۸۷٪ و نفت خام با ۳۵/۵۶٪ به ترتیب بیشترین تاثیر را در آسیب به منابع داشته است. فرآیندهایی مؤثر در آسیب به

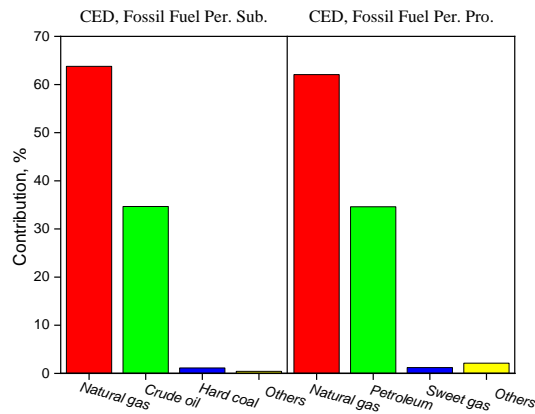
تجزیه و تحلیل دسته اثرات سمیت انسانی نشان داد که فلزاتی از جمله باریم، منگنز، وانادیوم، آرسنیک، سرب، سلنیوم، جیوه، و کادمیوم از عوامل مؤثر در دسته اثرات سمیت انسانی می‌باشند که در این میان باریم با ۳۲/۳۴٪ بیشترین تاثیر و به دنبال آن منگنز با ۲۴/۴۳٪ و وانادیوم با ۱۷/۶۳٪ نقش مهمی در ایجاد این دسته اثر ایفا می‌کنند. همچنین فرآیندهای تولید گاز طبیعی (۳۰/۴۲٪)، الکتریسیته (۲۴/۷۴٪) و پسماندهای سولفیدی (۱۶/۶۳٪) از جمله فرآیندهای مؤثر در ایجاد اثرات سمیت انسانی می‌باشند (شکل ۳a).

۳-۱-۴. تخلیه فسیلی

از نتایج اثرات تخلیه فسیلی می‌توان دریافت که گاز طبیعی، نفت خام، ذغال سنگ سخت، و ذغال سنگ قهوه‌ای مواردی هستند که سبب ایجاد دسته اثرات



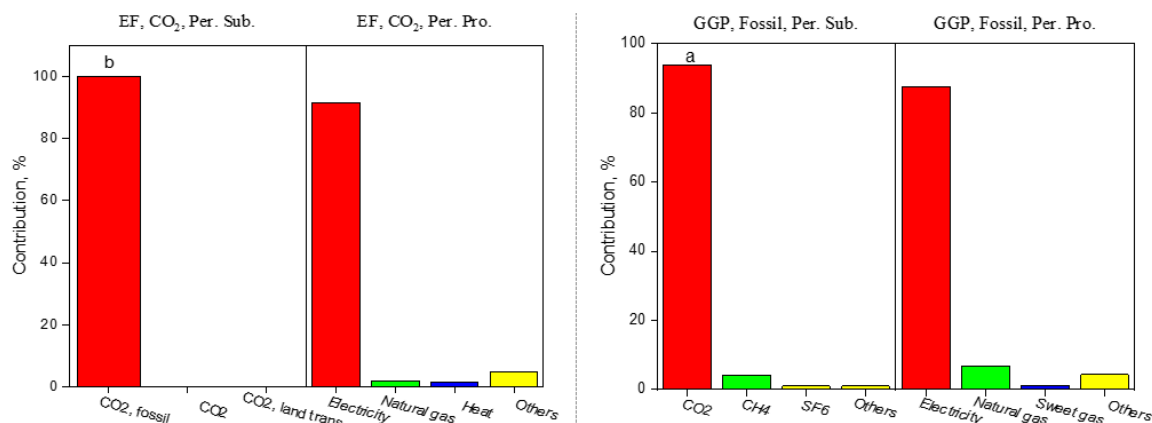
شکل ۴- نمودار مواد و فرآیندهای مؤثر در پیامدهای شاخص سطح پایانی



شکل ۵- نمودار مواد و فرایندهای مؤثر بر CED

الکتریسیته (۰.۸۲/۴۴)، گاز طبیعی (۰.۵/۸۲) و کربن نیتريد گرافیتی (۰.۲/۶۴) بودند که در شکل ۴ نشان داده شده است. علاوه بر این، CO₂، تغيير کاربری، CH₄ و N₂O مهمترين عوامل مؤثر در آسیب به بومسازگان معرفی شدند که در این میان CO₂ با ۰.۸۹/۴۵ بیشترین تاثیر و تغيير کاربری با ۰.۴/۰۷ در رتبه دوم قرار گرفت. ضمناً، فرآیندهای تولید

منابع نیز شامل گاز طبیعی (۰.۶۰/۳۰) و نفت خام (۰.۳۵/۵۰) بودند. در دسته اثرات آسیب به سلامت انسان، مواردی همچون CO₂، SO₂، NO، آمونیاک و متان نقش داشتند که در این میان CO₂ با ۰.۷۳/۴۴ بیشترین تاثیر بر سلامت انسان را به دنبال دارد و SO₂ با ۰.۷/۳۱ و NO با ۰.۵/۶ به ترتیب در رتبه‌های بعدی قرار می‌گیرند. فرآیندهای اصلی نیز شامل



شکل ۶- نمودار مواد و فرآیندهای مؤثر بر روش EF (a) و روش GGP (b)

CO₂ مربوط به مصرف سوخت‌های فسیلی است و دو ماده CO₂ (۹۳/۹۰٪) و متان (۴/۰۹٪) بیشترین ترکیبات تاثیرگذار در سوخت‌های فسیلی می‌باشند. این ترکیبات ناشی از فرآیند تولید الکتریسیته (۸۷/۶۵٪) و گاز طبیعی (۶/۸۱٪) بودند (شکل ۶a).

۳-۵. روش ردپای بوم‌شناسی

باتوجه به نتایج حاصل از رویکرد ردپای بوم‌شناسی، CO₂ با ۹۷/۰۷٪ بیشترین تاثیر را به خود اختصاص داد و به دنبال آن انرژی هسته‌ای با ۲/۷۴٪ و اشغال زمین با ۰/۱۹٪ در مراتب بعدی قرار گرفتند. همچنین استفاده از سوخت‌های فسیلی در تولید الکتریسیته با ۹۱/۵۳٪ مشارکت، عامل اصلی انتشار CO₂ شناخته شد. در حالی‌که فرایند تولید گاز طبیعی (۱/۹۸٪) و گرما (۱/۶۷٪) تأثیر اندکی به دنبال داشتند (شکل ۶b).

۳-۶. آنالیز حساسیت

با توجه به جدول ۲، آنالیز حساسیت بر مهم‌ترین عامل ایجادکننده اثرات محیط‌زیستی یعنی الکتریسیته انجام شد. نتایج حاصل از آنالیز حساسیت، مصرف الکتریسیته در تامین انرژی مورد نیاز سیستم را موثرترین پارامتر تاثیرگذار در بروز آثار مخرب محیط‌زیست مشخص نمود.

۴. بحث و نتیجه گیری

الکتریسیته (۸۳/۷۷٪)، گاز طبیعی (۴/۴۱٪) و همچنین چاه‌های ساحلی (۳/۷۰٪) بیشترین فرآیندهایی بودند که موجب آسیب به بوم‌سازگان شدند (شکل ۴).

۳-۳. روش CED

ارزیابی نتایج CED نشان داد که انرژی مورد نیاز برای سنتز g-C₃N₄ از مصرف سوخت‌های فسیلی تجدیدناپذیر (۹۵/۷۵٪)، انرژی هسته‌ای تجدیدناپذیر (۲/۱۶٪) و انرژی تجدیدپذیر آب (۱/۵۹٪) تأمین می‌شود. از عمده سوخت‌های به کاررفته می‌توان به گاز طبیعی، نفت خام، ذغال‌سخت، ذغال قهوه‌ای، معادن گاز، و پیت اشاره کرد که استفاده از گاز طبیعی با ۶۳/۷۸٪ و نفت خام با ۳۴/۶۶٪ به ترتیب بیشترین مشارکت در مصرف انرژی را به خود اختصاص دادند و به دنبال آن ذغال‌سنگ سخت با ۱/۱۴٪ در مصرف انرژی نقش مؤثری داشته است. علاوه بر این، فرآیندهای تولید گاز طبیعی (۶۲/۰۶٪)، تولید و مصرف نفت خام (۳۴/۶۱٪) و گاز شیرین (۱/۲۱٪) به‌طورقابل توجهی در افزایش مصرف سوخت‌های فسیلی تجدیدناپذیر نقش داشتند (شکل ۵).

۳-۴. روش GGP

نتایج GGP نشان داد که ۹۹/۷۶٪ از کل انتشار

دادند که انتشار فلزات ناشی از وسایل نقلیه مانند باریم، کروم، سرب، و نیکل در ایجاد سمیت حاصل از انسانی نقش دارد (Yay, 2015). Kazemi و همکاران (۲۰۱۸)، نشان دادند که مصرف الکتروسیسته در بالا بردن پیامدهای محیط‌زیستی از جمله سمیت انسانی نقش به‌سزایی دارد (Kazemi et al., 2018). می‌توان دریافت که اگر تا ۹۰ درصد مصرف الکتروسیسته در مقیاس صنعتی کاهش یابد، با کاهش چشم‌گیری از سهم ورودی الکتروسیسته در این پیامدها روبه‌رو خواهیم بود.

۴-۲. شاخص سطح پایانی

رویکرد سطح پایانی تأثیر محیط‌زیستی مواد شیمیایی یا فرایندها را در سه سطح سلامت انسان، بوم‌سازگان (تنوع زیستی) و منابع ارزیابی می‌کند. روش سطح پایانی ارزیابی اثرات را در مناطق مختلف حفاظت توصیف می‌کند، در حالی که روش سطح میانی علت و اثر مواد آزاد شده را در نظر می‌گیرد (Abyar et al., 2020; Dong and Ng, 2014). بررسی شاخص‌های پایانی، آثار مخرب محیط‌زیستی را به ترتیب آسیب به منابع (۰۵/۶۳٪) < آسیب به سلامت انسان (۵۶/۳۴٪) < آسیب به بوم‌سازگان (۳۹/۲٪) نشان داد. این سه دسته آثار به‌ترتیب مرتبط با استفاده از گاز طبیعی و فرایندهای مرتبط، دی‌اکسیدکربن رها شده حاصل از سوخت‌های فسیلی و بهره‌گیری از الکتروسیسته در روند سنتز بروز نمودند. نتایج به دست آمده با گزارش Ioannou-Ttofa و همکاران (۲۰۱۶)، مطابقت داشت. آن‌ها اشاره کردند که تخلیه نفت خام به‌عنوان منبع انرژی غیر قابل تجدید بر دسته آسیب به منابع تأثیر می‌گذارد (Ioannou-Ttofa et al., 2016). علاوه بر این، در مطالعه Benetto و همکاران (۲۰۰۹)، مشخص شد

پیامدهای محیط‌زیستی در دو سطح میانی با روش ReCiPi 2016 Midpoint (H) و سطح پایانی با روش ReCiPi 2016 Endpoint (H) مورد بررسی قرار گرفت. پس از کمی‌سازی پیامدهای محیط‌زیستی، در نهایت نرمال‌سازی داده‌ها جهت آنالیز و مقایسه نتایج انجام گرفت. خروجی شاخص اثرات میانی نشان داد که بیشترین تأثیرات محیط‌زیستی حاصل از سنتز $g-C_3N_4$ ، به ترتیب بوم‌شناسی آب شیرین (۳۱/۶۸٪) < سمیت انسانی (۶/۱۵٪) < و تخلیه فسیلی (۶/۰۲٪) بوده است.

۴-۱. شاخص سطح میانی

در دسته بوم‌شناسی آب دریا و آب شیرین، فلز مس و فرایندهای مرتبط با استحصال و بهره‌گیری از آن، بیشترین نقش را در آسیب‌های بوم‌شناختی دریایی و آب شیرین از خود نشان دادند که مطالعه Nowrouzi و Abyar (۲۰۲۱) نیز به نقش تخلیه فلزات در بروز بوم‌شناسی دریایی و بوم‌شناسی آب شیرین اشاره کرده است (Nowrouzi and Abyar, 2021). از سوی دیگر، فلز باریم و استفاده از گاز طبیعی در فرایند تولید کلان این فتوکاتالیست و تبدیلات و واکنش‌های مرتبط بهره‌گیری از این سوخت، مهم‌ترین عامل پدیدار شدن آثار سمیت انسانی بود. Renou و همکاران (۲۰۰۸) و Abyar و همکاران (۲۰۲۰) نیز سهم ۹۰ درصدی فلزات سنگین مانند سرب، کروم، و جیوه بر سلامت انسان را عنوان کردند که می‌تواند در تطابق با نتایج به‌دست آمده در مطالعه حاضر باشد (Abyar et al., 2020; Renou et al., 2008). علاوه بر این، Yay (۲۰۱۵) سیستم مدیریت پسماند جامد شهری را برای مطالعه تأثیرات محیط‌زیستی آن طراحی کردند و گزارش

استفاده از روش CED، تأیید کننده تأمین انرژی مورد نیاز سنتز از سوخت‌های فسیلی بود که از آن میان نیز گاز طبیعی بیشترین سهم را در تأمین انرژی سیستم به خود اختصاص داد. منابع انرژی تجدیدپذیر نسبت به نیروگاه‌های مبتنی بر سوخت‌های فسیلی منجر به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شوند. مطالعات Rahman و همکاران (۲۰۱۸)، نشان می‌دهد که منابع تجدیدپذیر مورد استفاده در تولید الکتريسيته به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای کمک می‌کند (Rahman et al., 2018). در بررسی Siddiqui و Dincer (۲۰۱۷)، تحلیل مقایسه‌ای دیگری انجام شده است که منابع تجدیدپذیر مانند انرژی هسته‌ای، باد، و انرژی الکتريسيته آبی نسبت به نیروگاه سوخت ذغال سنگ آلودگی محیط‌زیستی کمتری به دنبال دارند. در نتیجه استفاده از منابع تجدیدپذیر برای تولید الکتريسيته مقرون‌به‌صرفه‌ترین و قابل اطمینان‌ترین فرآیند برای توسعه پایدار است (Siddiqui and Dincer, 2017).

۴-۴: میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای با روش

GGP و ردپای بوم‌شناسی

روش GGP و ردپای بوم‌شناسی نیز بیشترین میزان تاثیر فرآیند سنتز $g-C_3N_4$ بر بروز پدیده گرمایش جهانی و آثار مخرب بوم‌شناختی را به ترتیب به انتشار گاز دی‌اکسیدکربن و فرآیند تأمین الکتريسيته سیستم مرتبط دانست. بنابراین، تلاش‌های جهانی برای دستیابی به جاذب CO_2 با بازدهی بالا و کمترین هزینه در حال انجام است. در مورد ردپای بوم‌شناسی در همین زمینه، Nowrouzi و همکاران (۲۰۲۱)، در تجزیه و تحلیل رویکرد ردپای بوم‌شناسی به وضوح به نقش غالب CO_2 ناشی از

که ۶۰٪ تخلیه منابع طبیعی با تولید الکتريسيته مرتبط است که نتایج به‌دست آمده از این مطالعه را تأیید می‌کند (Benetto et al., 2009). از نظر ارزیابی پیامدها، فرآیند تولید الکتريسيته مسئول آسیب به سلامت انسان، بوم‌سازگان، و منابع بود. آسیب به منابع در درجه اول به‌علت تخلیه سوخت‌های فسیلی است که در راستای تولید الکتريسيته و منابع معدنی برای ساخت تجهیزات مورد نیاز جهت استخراج، پردازش، و مصرف منابع مورد استفاده قرار می‌گیرد. Mathuriya و همکاران (۲۰۲۰) و Foteinis و همکاران (۲۰۱۸)، در مطالعه خود که سلامت انسان را مورد توجه قرار دادند، به این نتیجه رسیدند که مشکلات تنفسی ناشی از شبکه‌های تصفیه پساب به دلیل انتشار مواد معدنی بوده است (Foteinis et al., 2018; Mathuriya et al., 2020). این نتایج با نتایج Ioannou-Ttofa و همکاران (۲۰۱۶) و Abyar و Nowrouzi (۲۰۲۰) نیز مطابقت داشت (Ioannou-Ttofa et al., 2020; Abyar and Nowrouzi, 2020). لازم به ذکر است که CO_2 ناشی از سوخت‌های فسیلی به‌عنوان شاخص اصلی در آسیب به سلامت انسان و بوم‌سازگان شناخته شد. انتشار دی‌اکسیدگوگرد، اکسیدهای نیتروژن، و متان نیز تأثیر کمی بر سلامت انسان به دنبال داشتند. آزاد شدن دی‌اکسیدگوگرد می‌تواند با تولید اسید سولفوریک مرتبط باشد. این یافته‌ها با تحقیقات Zhou و Alyaseri (۲۰۱۷) مطابقت داشت که اثرات انرژی الکتريکی، انتشار مواد شیمیایی، و گاز طبیعی ناشی از فرآیند سوزاندن لجن را بر سلامت انسان گزارش کردند (Alyaseri and Zhou, 2017).

۴-۳. میزان مصرف انرژی با روش CED

و کاهش آلاینده‌های محیط زیستی استفاده نمود. همچنین می‌توان عنوان کرد که انجام پروژه‌های LCA پیش از کاربست آنان در مقیاس کلان، می‌تواند به‌عنوان یک مکانیسم موثر در التیام آثار مخرب محیطیستی محسوب گردیده و تصمیم‌گیران را در راستای افزایش بهره‌وری پروژه‌ها و حداکثر نمودن سازگاری آنان با اصول محیط‌زیست و در نتیجه نیل به‌سوی توسعه پایدار یاری کند.

سوخت‌های فسیلی اشاره کرده‌اند که هم‌راستا با نتایج به دست آمده در مطالعه حاضر می‌باشد (Nowrouzi *et al.*, 2021). با توجه به نتایج به‌دست آمده می‌توان بیان داشت که در صورت جایگزینی انرژی‌های تجدیدپذیر و کاهش استفاده از انرژی‌هایی با مبنای استفاده از سوخت‌های فسیلی، پیامدهای محیط‌زیستی حاصل از سنتز فتوکاتالیست $g-C_3N_4$ به‌صورت چشم‌گیری کاهش می‌یابد و می‌توان از این فتوکاتالیست در مقیاس کلان صنعتی

References

Abyar, H., Nowrouzi, M., 2020. Highly efficient reclamation of meat-processing wastewater by aerobic hybrid membrane bioreactor-reverse osmosis simulated system: A comprehensive economic and environmental study. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* 8(37), 14207-14216.

Abyar, H., Younesi, H., Nowrouzi, M., 2020. Life cycle assessment of A2O bioreactor for meat processing wastewater treatment: An endeavor toward the achievement of environmental sustainable development. *Journal of Cleaner Production* 257, 120575.

Alyaseri, I., Zhou, J., 2017. Towards better environmental performance of wastewater sludge treatment using endpoint approach in LCA methodology *Heliyon* 3(3), e00268.

Benetto, E., Nguyen, D., Lohmann, T., Schmitt, B., Schosseler, P., 2009. Life cycle assessment of ecological sanitation system for small-scale wastewater treatment. *Science of the total environment* 407(5), 1506-1516.

Chen, T., Shen, D., Jin, Y., Li, H., Yu, Z., Feng, H., Long, Y., Yin, J., 2017. Comprehensive evaluation of environ-economic benefits of anaerobic digestion technology in an integrated food waste-based methane plant using a fuzzy mathematical model. *Applied Energy* 208, 666-677.

Corominas, L., Foley, J., Guest, J., Hospido, A., Larsen, H., Morera, S., Shaw, A., 2013. Life cycle

assessment applied to wastewater treatment: state of the art. *Water research* 47(15), 5480-5492.

Dehghan, R., Anbia, M., 2017. Zeolites for adsorptive desulfurization from fuels: A review. *Fuel Processing Technology* 167, 99-116.

Dong, G., Zhang, Y., Pan, Q., Qiu, J., 2014. A fantastic graphitic carbon nitride ($g-C_3N_4$) material: electronic structure, photocatalytic and photoelectronic properties. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews* 20, 33-50.

Dong, Y.H., Ng, S.T., 2014. Comparing the midpoint and endpoint approaches based on ReCiPe-a study of commercial buildings in Hong Kong. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 19(7), 1409-1423.

Foteinis, S., Borthwick, A.G., Frontistis, Z., Mantzavinos, D., Chatzisyneon, E., 2018. Environmental sustainability of light-driven processes for wastewater treatment applications. *Journal of Cleaner Production* 182, 8-15.

Frischknecht, R., Jungbluth, N., Althaus, H.-J., Hischier, R., Doka, G., Bauer, C., Dones, R., Nemecek, T., Hellweg, S., Humbert, S., 2007. Implementation of life cycle impact assessment methods. *Ecoinvent Centre*. Report number: 3, 151.

Ioannou-Ttofa, L., Foteinis, S., Chatzisyneon, E., Fatta-Kassinou, D., 2016. The environmental footprint of a membrane bioreactor treatment process through life cycle analysis. *Science of the*

Total Environment 568, 306-318.

Ioannou-Ttofa, L., Foteinis, S., Chatzisyneon, E., Michael-Kordatou, I., Fatta-Kassinou, D., 2017. Life cycle assessment of solar-driven oxidation as a polishing step of secondary-treated urban effluents. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology* 92(6), 1315-1327.

Kazemi, A., Bahramifar, N., Heydari, A., Olsen, S.I., 2018. Life cycle assessment of nanoadsorbents at early stage technological development. *Journal of Cleaner Production* 174, 527-537.

Mathuriya, A.S., Hiloidhari, M., Gware, P., Singh, A., Pant, D., 2020. Development and life cycle assessment of an auto circulating bio-electrochemical reactor for energy positive continuous wastewater treatment. *Bioresource Technology* 304, 122959.

Nowrouzi, M., Abyar, H., 2021. A framework for the design and optimization of integrated fixed-film activated sludge-membrane bioreactor configuration by focusing on cost-coupled life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production* 296, 126557.

Nowrouzi, M., Abyar, H., Younesi, H., Khaki, E., 2021. Life cycle environmental and economic assessment of highly efficient carbon-based CO₂ adsorbents: A comparative study. *Journal of CO₂ Utilization* 47, 101491.

Ong, W.-J., Tan, L.-L., Ng, Y.H., Yong, S.-T., Chai, S.-P., 2016. Graphitic carbon nitride (g-C₃N₄)-based photocatalysts for artificial photosynthesis and environmental remediation: are we a step closer to achieving sustainability?. *Chemical reviews* 116(12), 7159-7329.

Oturan, M.A., Aaron, J.-J., 2014. Advanced oxidation processes in water/wastewater treatment: principles and applications. A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 44(23), 2577-2641.

Rahman, M.N., Sharif, M.R., Chowdhury, M.H.R., Ahamad, K.S., Shoeb, M.A., 2018. *Transition Towards 100% Renewable Energy*, Springer, pp: 365-378.

Renou, S., Thomas, J., Aoustin, E., Pons, M., 2008. Influence of impact assessment methods in wastewater treatment LCA. *Journal of Cleaner Production* 16(10), 1098-1105.

Rodríguez, R., Espada, J., Pariente, M., Melero, J., Martínez, F., Molina, R., 2016. Comparative life cycle assessment (LCA) study of heterogeneous and homogenous Fenton processes for the treatment of pharmaceutical wastewater. *Journal of Cleaner Production* 124, 21-29.

Serra, A., Domènech, X., Brillas, E., Peral, J., 2011. Life cycle assessment of solar photo-Fenton and solar photoelectro-Fenton processes used for the degradation of aqueous α -methylphenylglycine. *Journal of Environmental Monitoring* 13(1), 167-174.

Siddiqui, O., Dincer, I., 2017. Comparative assessment of the environmental impacts of nuclear, wind and hydro-electric power plants in Ontario: a life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production* 164, 848-860.

Standardization, I.O.f., 2006a. *Environmental Management: Life Cycle Assessment: Requirements and Regulations*, ISO 14044, 46 p.

Standardization, I.O.f., 2006b. *Environmental Management: Life Cycle Assessment; Principles and Framework*, ISO 14040, 20 p.

Tabesh, M., Masooleh, M.F., Roghani, B., Motevallian, S.S., 2019. Life-cycle assessment (LCA) of wastewater treatment plants: A case study of Tehran, Iran. *International Journal of Civil Engineering* 17(7), 1155-1169.

Wang, L., Fang, D., Wang, Y., Tian, H., Liu, J., Ren, W., 2018. Impact of diffusion at the gas/liquid interface on deep hydrodesulfurization of fluid catalytic cracking naphtha. *Chemical Engineering Journal* 346, 369-375.

Wen, J., Xie, J., Chen, X., Li, X., 2017. A review on g-C₃N₄-based photocatalysts. *Applied surface science* 391, 72-123.

Yay, A.S.E., 2015. Application of life cycle assessment (LCA) for municipal solid waste management: a case study of Sakarya. *Journal of Cleaner Production* 94, 284-293.

Zadgaonkar, L.A., Mandavgane, S.A., 2020. Framework for calculating ecological footprint of process industries in local hectares using energy and LCA approach. *Clean Technologies and Environmental Policy* 22(10), 2207-2221.

Zampori, L., Dotelli, G., 2014. Design of a sustainable packaging in the food sector by

applying LCA. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 19(1), 206-217.

Zheng, Y., Liu, J., Liang, J., Jaroniec, M., Qiao, S.Z., 2012. Graphitic carbon nitride materials: controllable synthesis and applications in fuel cells and photocatalysis. *Energy & Environmental Science* 5(5), 6717-6731.