تاثیر زیستی نور مصنوعی در شب: یک چالش پژوهشی

نیما یزدان بخش

تهران، دانشگاه تهران، پردیس علوم، دانشکده زیست شناسی و قطب تبارزایی موجودات زنده

چکیده

شکل گیری و توسعه پدیده های زیستی بر روی کره زمین در پاسخ به الگوی متناوبی از نور صورت گرفته که به شکل طبیعی در بازه های روزانه، ماهیانه و یا فصلی در محیط رخ داده است. با این حال، پیشرفت های زندگی بشر طی صد سال گذشته منجر به وارد شدن نور مصنوعی به محیط طبیعی، بخصوص در شب و شکل گیری نور مصنوعی شبانه (ALAN) شده است. علی رغم تنوع زیاد منابع نور مصنوعی _ از نظر شدت و طیف نوری_ این موضوع باعث اختلال بزرگی در الگوی طبیعی نور شده است. در نتیجه، بر روی سطح زمین نور در زمان ها و مکان ها، و با شدت ها و در طیف هایی ارائه شده که به شکل طبیعی وجود نداشته و از این رو کاملا بی سابقه است. علی رغم مزایای بیشمار نور مصنوعی در پیشرفت زندگی و جوامع شهری، می توان انتظار داشت که این اختلال بی سابقه در الگوی طبیعی نور بر سامانه های زیستی تاثیرات فراوانی بر جای گذارد. پژوهش های بسیاری در این زمینه انجام شده و به چاپ رسیده اند. علی رغم پیشرفت های وسیع در فن آوری، ابزارهای اندازه گیری و روش های محاسبات زیستی، گستردگی آثار و زمان طولانی که برای مشاهده تغییرات در سامانه های زیستی لازم است، انجام بررسی هایی از این دست را به چالشی بزرگ برای محققین تبدیل کرده است. این مقاله به معرفی چالش هایی که محققین در بررسی تغییرات الگوی تابش نور بر موجودات زنده، جمعیت ها و اکوسیستم ها با آن مواجهند می پردازد.

واژه های کلیدی: نور مصنوعی، تأثیر زیستی، ALAN، اختلال در نور طبیعی، آسمان تابی

نویسنده مسئول: yazdanb@ut.ac.ir

چالش

از آغاز پیدایش زندگی بر روی کره زمین، تناوب طبیعی نور در روز، ماه و یا فصل الگوی تغییرات محیطی بوده است. این تناوب ها باعث رشد و توسعه پدیده های زیستی از مولکول ها تا اکوسیستم شده اند که شامل مسیر های متابولیسمی و فیزیولوژیک، رفتار تک تک موجودات زنده، الگوی جغرافیایی سازگاری و غنای گونه ها، و چرخه های اکوسیستم ها می شود (۱-۴). در حقیقت شاید بتوان گفت که سامانه های زیستی، پیش تر توسط نور سازمان دهی شده اند (۵-۷).

طی صد سال گذشته، با ورود نور مصنوعی به محیط شب (شکل گیری نور مصنوعی شبانه، ARTIFICIAL LIGHT AT NIGHT =ALAN)، الگوی طبیعی نور به میزان زیادی دچار اختلال شده است. این امر در اثر منابع گوناگون نور ایجاد شده است. این منابع متنوع نور شامل نور چراغ های معابر، نور تابلو های تبلیغاتی، نورپردازی ساختمان ها و ابنیه، نور تابلوهای ایمنی، نور منازل و نور وسایل نقلیه است. ALAN الگوی نور طبیعی را به دو شکل مختل کرده است؛ هم به صورت تاثیر مستقیم نور منابع مختلف و هم از طریق پدیده آسمان‌تابی (پراش حاصل از مولکول های اتمسفری و یا گرد و غبار موجود در اتمسفر ALAN، که به سمت بالا تابیده و یا منعکس می‌شود، ۸-۱۰).

بر روی سطح زمین، این اختلال در الگوی طبیعی نور به دو شکل اصلی دیده می شود (۱۱). اول، نور در مکان ها، زمان ها و با شدت هایی ارائه شده است که به شکل طبیعی وجود نداشته اند. این موضوع از طریق تصاویر برگرفته توسط ماهواره ها از سطح زمین که میزان ALAN، زیرساخت های شهری و مراکز تجمع جمعیت را نشان می‌دهند، کاملا به اثبات رسیده است (۱۲ و ۱۳). به کار بردن تصاویر برای تقسیم بندی میزان ALAN بسیار پرچالش است، به خصوص که وسعت مناطقی که ثبت شده است، عمدتا به دلیل پدیده آسمان‌تابی ، بیشتر از زیرساخت های شهری است. بر اساس یکی از تخمین هایی که به طور خاص تاثیرات آسمان‌تابی را مورد بررسی قرار داده بود، ۱۸,۷٪ سطح کره زمین در معرض ALAN است (۱۲). بررسی دیگری که بیشتر بر پایه تصاویر

ماهواره ای انجام گرفت نشان داد که ۱۱,۴٪ سطح خشکی‌ها، و ۰,۲٪ مساحت آبهای زمین در معرض ALAN هستند (۱۱). از سوی دیگر، مطالعه دیگری نشان داد که ALAN با نرخ حدود ۶٪ در سال و با تنوع جغرافیایی زیادی (۲۰٪-۰) در حال افزایش است (۱۴).

دوم اینکه طیف نوری ALAN با نور خورشید، ماه و یا ستارگان متفاوت است (۱۱). طیف ALAN اساسا به نوع منبع نوری مورد استفاده بستگی دارد که می تواند از یک طیف محدود (مثل طیف سدیم کم فشار) تا یک طیف وسیع (مثل تخلیه شدید بار و دیود ساطع کننده نور (LED)، ۱۵) متنوع باشد. علی رغم تنوع فن آوری غالب در مناطق جغرافیایی مختلف که گاه حتی در یک محدوده کوچک هم ناهمگون است، به طور کلی استفاده از منابع نور سفید رایج تر است. این منابع نور، عمدتا دارای یک جزء قوی در قسمت آبی طیف (به ویژه با استفاده از LEDها، ۱۶) هستند.

بر خلاف بسیاری از تغییرات محیطی دیگر ایجاد شده توسط بشر (مثلا در CO2، دما و تغییرات اقلیمی)، تغییرات حاصل از ALAN کاملا بی سابقه هستند و پیش از این هیچ پدیده طبیعی که از لحاظ ماهیت، شدت، وسعت، زمان بندی و یا نرخ پخش شدن مشابه ALAN باشد وجود نداشته است (۱۱ و ۱۷).

با این که به کارگیری ALAN مزایای برجسته و اساسی برای بشر به همراه داشته است، اگر سامانه های زیستی اساسا بر پایه نور شکل گرفته باشند و ALAN الگوی نور را به نحوی جدید و بی سابقه تغییر داده باشد، می توان انتظار داشت که ALAN تاثیرات زیستی فراوانی داشته باشد. این نگرانی بحث جدیدی نیست (۲۰-۲۳). مدتهاست که این نگرانی ها وجود داشته اند و بسیاری از پژوهش ها که نشان دهنده چنین آثاری هستند به چاپ رسیده اند (برای نمونه های اخیر به ۲۴-۳۱ مراجعه کنید). با این حال، درک وخامت واقعی این معضل، چالش برانگیز و زمان‌بر است. با توجه به استفاده سریع و گسترده از نور LED و به کارگیری نورپردازی هوشمند (۱۶)، امروزه امکان تنظیم ALAN، و از این طریق، کاهش آثار محیطی منفی آن فراهم شده است. با این حال، این موضوع نیازمند درک صحیحی از تبعات شدت و ترکیب طیفی ALAN می باشد. این چالش پژوهشی در مقاله حاضر به اشکال کلیدی و متفاوتی نشان داده می شود. در این مقاله به بررسی چالش هایی می پردازیم که مربوط به نور، موجودات زنده منفرد و یا جمعیت ها، اجتماعات و اکوسیستم ها هستند.

نور

درک الگوهای ALAN به طور عمده بر اساس تحلیل تصاویر ماهواره ای (۱۲ و ۳۲)، نقشه برداری های هوایی (۳۳و ۳۴) و همچنین اندازه گیری های زمینی تابش مستقیم و یا آسمان‌تابی (۸ و ۳۵، و برخی از این تحلیل ها که از داده های شهری استفاده می کنند، مانند ۳۶) صورت می گیرد. ارزشمندی این روش ها اثبات شده است و شناخت بسیار خوبی به ما می دهند. با این حال، برای درک تبعات زیستی ALAN، لازم است که نتایج به دست آمده از این تحلیل ها به روش های مختلف مورد ارزیابی قرار گیرند.

اول، لازم است که توجه بیشتری به تفاوت در ماهیت و اهمیت نسبی سه منبع اصلی ALAN، یعنی تابش مستقیم، نوری که توسط پوشش ابر ها پراش می یابد و نوری که از آسمان صاف پخش می شود، معطوف گردد (۳۷). بیشترین بررسی های انجام گرفته در مورد ALAN از طریق مطالعه تابش مستقیم است و نمودارهای نوعی نشان دهنده ALAN، عمدتا بر اساس تابش یک یا چند شکل از روشنایی های معابر تهیه می شوند. با این حال، پراش اتمسفری نور، و پدیده آسمان_تابی حاصل از آن نیز احتمالا به همان اندازه اهمیت دارند، چرا که در حالی که تابش مستقیم ممکن است از چند متر تا صدها متر وسعت یابد و به آسانی توسط موانع محدود می شود، پدیده آسمان‌تابی از چند کیلومتر تا چند صد کیلومتر گسترش پیدا می کند (۱۷) و بسیار کمتر تحت تاثیر موانع بازدارنده قرار می گیرد (۳۷). به بیان دیگر، و به خصوص با استفاده از ابزارهای رایانه ای که امروزه در دسترس هستند، لازم است مسایل بیشتری در ارتباط با ماهیت پدیده آسمان‌تابی مورد بررسی و شناسایی قرار گیرند.

دوم، لازم است که به طیف های مختلف ALAN توجه بیشتری شود. ALAN عمدتا به صورت شدت روشنایی و از منظر بینایی انسان مورد توجه قرار می گیرد. با این حال، نه تنها حساسیت فرایند های زیستی (مانند فتوسنتز، ساعت

زیستی و بینایی) در بازه های مختلف طیف نوری متفاوت است، بلکه شکل این فرایند ها نیز با توجه به طیف نور تغییر می کند. به علاوه، این فرایند ها نه تنها از تابش مستقیم نور، بلکه از پدیده آسمان_تابی و برهمکنش این دو با یکدیگر نیز تاثیر می پذیرند. به عنوان مثال، ابر های موجود در بالای مناطق شهری بر سهم نور قرمزی که به سطح زمین می رسد تاثیر بیشتری دارند تا نور آبی (۳۸). تصور می شود منابع نور قرمز، به دلیل شدت بیشتر پراش ری لی (Rayleigh scattering) در طول موج های کوتاه، باعث کاهش پدیده آسمان_تابی می شوند (۱۰و۳۹).

سوم و شاید مهم ترین مساله آن است که تاثیر ALAN بر موجودات زنده، و چگونگی تغییرات این آثار کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. علی رغم کمبود اطلاعات کافی، چنین برداشت می شود که میزان متوسط ALAN تنها آن مقداری است که توسط موجودات زنده همان محیط احساس می شود. با این حال، و بویژه با در نظر گرفتن بزرگ نمایی فضایی که در نقشه نگاری ALAN به کار گرفته شده است، جانوران با قدرت جابجایی و در نتیجه انتخاب زیستگاه خود می توانند به شکل غریزی از الگوهای ناهمگون ALAN پرهیز نمایند. در یکی از معدود تحقیقات انجام شده تا به امروز، دومینونی (Dominoni) و پارتکه (Partecke) (۴۰) نشان دادند که توکاهای سیاه در اثر ALAN روز طولانی تری را احساس می کنند.

موجودات زنده منفرد

اکثر مطالعات انجام گرفته در مورد تبعات زیستی ALAN، به بررسی اثرات آن بر روی موجودات زنده منفرد پرداخته اند. چنین مطالعاتی شامل طیف وسیعی از پژوهش ها می‌شود که از آن میان می توان به بررسی بیان ژن ها (۴۱ و ۴۲)، فیزیولوژی (۴۳-۴۶)، رفتار جست و جوی غذا (۲۴و ۴۷-۵۰)، جابجایی روزانه (۵۱-۵۵)، مهاجرت (۵۶ و ۵۷)، رفتارهای تولید مثلی (۵۸-۶۲) و مرگ و میر (۶۳ و ۶۴) اشاره کرد. تقریبا هیچ یک از بررسی های منتشر شده حاکی از بی اثر بودن ALAN نبوده است (۳۵). بر این اساس می توان نتیجه گرفت که یا تبعات زیستی ALAN بسیار فراگیر هستند و یا انتشار مقالات در این زمینه تحت تاثیر پدیده سودگیری در گزارش نتایج مثبت (مکتوب)* قرار دارد (۶۵). علی رغم آنکه تاثیر گذاری نسبی پدیده سودگیری در گزارش نتایج مثبت دور از انتظار نیست، به نظر می رسد واقعیت چیزی بین این دو برداشت باشد.

چیزی که فقدان آن به وضوح دیده می شود؛ درک کاملی از چگونگی تغییر آثار زیستی ALAN در میان موجودات منفرد، در دوره های مختلف زندگی، شرایط زمانی و مکانی و یا اشکال متفاوت ALAN است. در رابطه با موجودات زنده، چالش های اساسی که در پیش رو قرار دارند عبارتند از: ۱) چگونگی تغییر واکنش های درون گونه ای نسبت به ALAN در میان رده های مختلف موجودات زنده (با توجه به جنسیت، سن، جثه). ۲) چگونگی تفاوت واکنش به ALAN در بین گونه های مختلف. در حال حاضر بیشتر مطالعات بر روی پرندگان و پستانداران متمرکز است (۶۶)، درحالی که تقریبا هیچ اطلاعاتی در مورد تاثیر ALAN بر روی میکروارگانیسم ها (به جز ۶۷) و گیاهان (به جز ۶۸) وجود ندارد و در مورد بی مهرگان اطلاعات اندکی موجود است(به استثنای بیدها، ۶۸، ۷۰ و ۷۱، برای یک بررسی مروری به ۶۹ نگاه کنید). ۳) چگونه پاسخ های مشاهده شده در موجودات زنده آزمایشگاهی و یا انسان ها نسبت به ALAN قابل تعمیم به جانوران موجود در حیات وحش می باشد؟ اهمیت این موضوع با در نظر گرفتن شواهدی که نشان می دهد تاثیر تنش ها و یا بیماری ها در موجودات آزمایشگاهی و یا اهلی بیشتر است (۷۲) و همچنین با توجه به تعداد بسیار اندک بررسی هایی که بر روی موجودات زنده وحشی انجام شده است بیشتر می شود. ۴) چگونه واکنش های متابولیسمی، فیزیولوژیک و رفتاری در مقابل ALAN بر روی شایستگی موجودات زنده اثر می گذارند؟ با این حال، مطالعاتی در جهت روشن نمودن چنین تاثیراتی بر روی شایستگی آغاز شده اند (۶۲).

در رابطه با خود ALAN، چالش های اصلی شامل تعیین موارد زیر است: ۱) شکل رابطه دوز-پاسخ در مورد گستره‌ای از تبعات زیستی ALAN. میتوان گفت که بررسی های انجام شده تا به امروز تنها به بررسی دو تیمار ALAN

* File drawer problem= این اصطلاح که اولین بار در سال ۱۹۷۹ توسط رابرت روزنتال بیان شد اشاره به نوعی جهت گیری در منابع علمی دارد که به دلیل تمایل محققین به انتشار نتایج مثبت تحقیقاتی، و خودداری آنان از انتشار نتایج منفی و یا تایید نشده روی می دهد.

پرداخته اند (حضور و یا فقدان ALAN) و این موضوع مانع از آن می شود که بتوان شدت آستانه ای برای پاسخ نسبت به ALAN تعیین و یا شکل کلی توابع دوز-پاسخ را شناسایی کرد. ۲) شکل رابطه طیف-پاسخ در مورد گستره وسیعی از تبعات زیستی ALAN. در اینجا نیز، مشابه بررسی های دوز-پاسخ، تحقیقات نوین تنها تیمار های محدودی از طیف های نوری را مورد بررسی قرار می‌دهند (۶۸، ۷۱ و ۷۳) و یا از منابع نوری معمول، که دارای طیف های رنگی متفاوت هستند استفاده می کنند (۷۴ و ۷۵). این در حالی است که به منظور ارائه راهکار های مفید جهت محدود سازی تبعات زیستی منفی ALAN، درک روابط دوز-پاسخ و همچنین روابط طیف-پاسخ، و بر همکنش آنها با یکدیگر ضروری است.

جمعیت ها، اجتماعات و اکوسیستم ها

با اینکه اثر گذاری ALAN بر فیزیولوژی و رفتار موجودات زنده منفرد به اثبات رسیده است، ارتباط میان این تاثیرات فردی با جمعیت ها، اجتماعات و اکوسیستم ها کمتر شناخته شده است. در این زمینه مشکل اساسی آن است که تعداد مطالعات انجام گرفته بسیار محدود است (۲۷، ۶۷، ۶۸، ۷۱، ۷۶ و ۷۷).

یکی از چالش های موجود در راه تعیین تبعات ALAN بر روی جمعیت ها این است که علی رغم آنکه ALAN به صورت بالقوه بر هر یک از متغیر های جمعیت شناختی (زاد و ولد، مرگ و میر، مهاجرت به داخل و کوچ) تاثیر می گذارد، بررسی تمامی این متغیر ها برای یک گونه منفرد مشکل است (۷۸). در این راستا، در مورد گونه هایی که بررسی نرخ زاد و ولد و مرگ و میر آنها نسبتا ساده است، بررسی نرخ مهاجرت به داخل و کوچ مشکل است و بالعکس.

علی رغم اینکه تحقیقات گزارش شده نشان می دهند ALAN بر رابطه شکار-شکارچی تاثیر می گذارد (۵۰و ۷۹ و ۸۰)، مشخص نیست این تاثیر در میان اجتماعات مختلف چگونه تغییر می کند (۱۱). بنی و همکاران گزارشی تجربی ارائه کرده اند که نشان دهنده تاثیر پایین به بالا، و نه بالا به پایین در اجتماعات ساده گیاه-گیاهخوار-شکارچی است(۶۸).

پیش بینی قابل استناد تبعات اکولوژیک ALAN در سامانه های طبیعی، نیازمند درک بهتر فرایندهای طولانی مدتی است که حساسیت جمعیت ها، اجتماعات و اکوسیستم ها نسبت به یک محیط روشن را تعیین می کنند. این در حالی است که بیشتر دانش کنونی ما بر اساس آزمایش های کوتاه مدتی است که در طول چند روز و یا حداکثر چند هفته انجام شده و امکان در نظر گرفتن مکانیزم های واکنشی، مانند سازگاری و خوگیری، و مکانیزم های فیزیولوژیک جبرانی، رفتاری و حتی تکاملی که به شرایط محیطی و زمانبندی فصول وابسته هستند را فراهم نمی‌سازند. به عنوان مثال، بر اساس یکی از تحقیقات انجام شده، برای ایجاد تغییری واضح در یک اجتماع میکروبی آب شیرین، به یک دوره زمانی بیش از یک سال نیاز است (۶۷).

با این که هنوز نمی توان تصویری از شدت و چگونگی این آثار داشت، مسلما باید منتظر تغییراتی در عملکرد اکوسیستم ها بود (۷ و ۱۱). به عنوان مثال، برای کارکرد طبیعی اکوسیستم ها در مناطق گرمسیری، وجود جانورانی که شبانه دانه های گیاهان را پخش می کنند (مانند خفاش‌ها) حیاتی است. بررسی ها نشان می دهد که ALAN با کاهش فعالیت شبانه جانوران پخش کننده دانه موجب اختلال توالی طبیعی جنگل ها و پیوستگی زمین های جنگلی شده است (۲۹). یک مثال دیگر که مورد بررسی قرار گرفته است مربوط به تجمعات میکروبی می‌باشد که در گل و لای رسوب یافته در بسترهای آبی زندگی می کنند. این تجمعات تجمع گونه ای بسیار زیادی دارند و نقش بسیار مهمی در چرخه جهانی کربن ایفا می‌کنند. هولکر و همکاران (۶۷) نشان دادند که ALAN موجب تغییراتی در ترکیب گونه ای این جمعیت ها می‌شود. این مساله تبعاتی بر عملکرد اکوسیستم دارد (در این مورد کانی سازی کربن) که میتواند حتی تولید اکوسیستمی خالص چنین مجموعه هایی را در شب، از منفی به مثبت تغییر دهد.

به منظور تعیین آثار ALAN بر روی جمعیت ها، اجتماعات و اکوسیستم ها به شکلی موثرتر، تکرار چنین آزمایشهای میدانی ضروری است. از اولین مطالعات در این زمینه، مطالعه ECOLIGHT (۶۸)، مطالعه "Verlust der Nacht" (۶۷) و مطالعه LightOnNature (۷۱) قابل ذکر

هستند. شواهد اولیه حاکی از آن است که ممکن است میان مطالعاتی که در سال های مختلف بر روی تاثیر ALAN انجام می شوند، اختلاف معنی داری دیده شود. این نتایج بر اهمیت طراحی و یا ادامه اجرای مطالعات گسترده در دوره های زمانی بلند مدت که در برگیرنده نسل های پیاپی از گونه های کلیدی موجودات زنده باشد تاکید می کنند.

نتیجه گیری

تنها در طول چند سال اخیر رغبت فراوانی برای تحقیق در مورد تبعات زیستی ALAN (گرچه این موضوع ریشه های تاریخی بسیار عمیقی دارد، ۶۹ و ۸۱–۸۳) به وجود آمده است. این امر توسط چند عامل به پیش رانده شده است: ۱) چندین گزارش دولتی که بیان می کنند تاثیرات ناشی از ALAN یکی از مخرب ترین اختلالاتی هستند که توسط بشر در محیط زیست ایجاد شده اند (۸۴–۸۶)؛ ۲) نیاز رو به افزایش جامعه بشری به کاستن هزینه انرژی با تغییر سیستم های روشنایی معابر و دستاوردهای محیط زیستی بالقوه ای که با آن همراه است (۸۷ و ۸۸)؛ ۳) روی آوری گسترده به منابع نوری LED و تقاضای فزاینده بر طراحی لامپ هایی با طیف نوری سازگار با اکوسیستم (۱۴، ۶۶ و ۸۹) و ۴) شکل گیری همزمان و مستقل دو برنامه تحقیقاتی وسیع، یکی برای تعیین تجربی تبعات ALAN (۶۷، ۶۸ و ۷۱) و دیگری برنامه تحقیقات بین رشته ای تحت عنوان "از دست رفتن شبکه شبانه" که با پشتوانه مالی اتحادیه اروپا انجام می گیرد. فعالیت های تحقیقاتی که در اثر این برنامه ها آغاز شد نوید بخش تعیین تبعات زیستی ALAN است. همچنین، این فعالیت های تحقیقاتی زمینه های اصلی مطالعات آتی را مشخص ساخته است و در حال تبیین سیاست هایی است که لازم است به منظور کاهش نگرانی های مربوط به محیط زیست اتخاذ شوند. این موضوع به تحقیقات آتی کمک شایانی خواهد کرد.

منابع

1. Arendt J. 1998 Melatonin and the pineal gland: influence on mammalian seasonal and circadian physiology. *Rev. Reprod.* **3**, 13–22. (doi:10.1530/ror.0.0030013)
2. Hays GC. 2003 A review of the adaptive significance and ecosystem consequences of zooplankton diel vertical migrations. *Hydrobiologia* **503**, 163–170. (doi:10.1023/B:HYDR.0000008476.23617.b0)
3. Urbanski J, Mogi M, O'Donnell D, DeCotiis M, Toma T, Armbruster P. 2012 Rapid adaptive evolution of photoperiodic response during invasion and range expansion across a climatic gradient. *Am. Nat.* **179**, 490–500. (doi:10.1086/664709)
4. Bennie J, Duffy JP, Inger R, Gaston KJ. 2014 The biogeography of time partitioning in mammals. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* **111**, 13 727–13 732. (doi:10.1073/pnas.1216063110)
5. Kronfeld-Schor N, Dayan T. 2003 Partitioning of time as an ecological resource. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* **34**, 153–181. (doi:10.1146/annurev.ecolsys.34. 011802.132435)
6. Bradshaw WE, Holzapfel CM. 2010 Light, time, and the physiology of biotic response to rapid climate change in animals. *Annu. Rev. Physiol.* **72**, 147–166. (doi:10.1146/annurev-physiol-021909-135837)
7. Hölker F, Wolter C, Perkin EK, Tockner K. 2010 Light pollution as a biodiversity threat. *Trends Ecol. Evol.* **25**, 681–682. (doi:10.1016/j.tree.2010.09.007)
8. Kyba CCM, Ruhtz T, Fischer J, Hölker F. 2011 Cloud coverage acts as an amplifier for ecological light pollution in urban ecosystems. *PLoS ONE* **6**, e17307. (doi:10.1371/journal.pone.0017307)
9. Davies TW, Bennie J, Inger R, Gaston KJ. 2013 Artificial light alters natural regimes of night-time

sky brightness. *Sci. Rep.* **3**, 1722. (doi:10.1038/srep01722)
10. Luginbuhl CB, Boley PA, Davis DR. 2014 The impact of light source spectral power distribution on sky glow. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.* **139**, 21–26. (doi:10.1016/j.jqsrt.2013.12.004)
11. Gaston KJ, Duffy JP, Gaston S, Bennie J, Davies TW. 2014 Human alteration of natural light cycles: causes and ecological consequences. *Oecologia* **176**, 917–931. (doi:10.1007/s00442-014-3088-2)
12. Cinzano P, Falchi F, Elvidge CD. 2001 The first World Atlas of the artificial night sky brightness. *Mon. Notes R. Astron. Soc.* **328**, 689–707. (doi:10.1046/j. 1365-8711.2001.04882.x)
13. Davies TW, Duffy JP, Bennie J, Gaston KJ. 2014 The nature, extent and ecological implications of marine light pollution. *Front. Ecol. Environ*. **12**, 347–355. (doi:10.1890/130281)
14. Hölker F et al. 2010 The dark side of light: a transdisciplinary research agenda for light pollution policy. *Ecol. Soc.* **15**, 13.
15. Elvidge CD, Keith DM, Tuttle BT, Baugh KE. 2010 Spectral identification of lighting type and character. *Sensors* **10**, 3961–3988. (doi:10.3390/s100403961)
16. Haitz R, Tsao JY. 2011 Solid-state lighting—why it will succeed, and why it won't be overtaken. *Opt. Photonics* **6**, 26–30. (doi:10.1002/opph.201190325)
17. Kyba CCM, Hölker F. 2013 Do artificially illuminated skies affect biodiversity in nocturnal landscapes? *Landscape Ecol.* **28**, 1637–1640. (doi:10.1007/s10980-013-9936-3)
18. Gaston KJ, Gaston S, Bennie J, Hopkins J. In press. Environmental benefits and costs of artificial nighttime lighting. *Environ. Rev.*
19. Meier J, Hasenöhrl U, Krause K, Pottharst M (ed). 2015 *Urban lighting, light pollution and society*. New York, NY: Routledge.
20. Squires WA, Hanson HE. 1918 The destruction of birds at the lighthouses on the coast of California. *Condor* **20**, 6–10. (doi:10.2307/1362354)
21. Verheijen FJ. 1960 The mechanisms of the trapping effect of artificial light sources upon animals. *Arch. Néerland. Zool.* **13**, 1–107. (doi:10.1163/036551 660X00017)
22. Frank K. 1988 Impact of outdoor lighting on moths: an assessment. *J. Lepidopterists Soc.* **42**, 63–93.
23. Kerenyi NA, Pandula E, Feuer G. 1990 Why the incidence of cancer is increasing—the role of 'light pollution'. *Med. Hypotheses* **33**, 75–78. (doi:10.1016/0306-9877(90)90182-E)
24. Dwyer RG, Bearhop S, Campbell HA, Bryant DM. 2012 Shedding light on light: benefits of anthropogenic illumination to a nocturnally foraging shorebird. *J. Anim. Ecol.* **82**, 478–485. (doi:10.1111/1365-2656.12012)
25. Le Tallec T, Perret M, The´ry M. 2013. Light pollution modifies the expression of daily rhythms and behavior patterns in a nocturnal primate. *PLoS ONE* **8**, e79250. (doi:10.1371/journal.pone.0079250)
26. Mazor T, Levin N, Possingham HP, Levy Y, Rocchini D, Richardson AJ, Kark S. 2013 Can satellite-based night lights be used for conservation? The case of nesting sea turtles in the Mediterranean. *Biol. Conserv.* **159**, 63–72. (doi:10.1016/j.biocon.2012.11.004)
27. Meyer LA, Sullivan SMP. 2013 Bright lights, big city: influences of ecological light pollution on reciprocal stream-riparian invertebrate fluxes. *Ecol. Appl.* **23**, 1322–1330. (doi:10.1890/12-2007.1)
28. Picchi MS, Avolio L, Azzani L, Brombin O, Camerini G. 2013 Fireflies and land use in an urban landscape: the case of *Luciola italica* L. (Coleoptera: Lampyridae) in the city of Turin. *J. Insect Conserv.* **17**, 797–805. (doi:10.1007/s10841-013-9562-z)
29. Lewanzik D, Voigt CC. 2014 Artificial light puts ecosystem services of frugivorous bats at risk. *J. Appl. Ecol.* **52**, 388–394. (doi:10.1111/1365-2664.12206)
30. Pawson SM, Bader MK-F. 2014 LED lighting increases the ecological impact of light pollution irrespective of color temperature. *Ecol. Appl.* **24**, 1561–1568. (doi:10.1890/14-0468.1)
31. van Geffen KG, van Grunsven RHA, van Ruijven J, Berendse F, Veenendaal EM. 2014 Artificial light at night causes diapause inhibition and sex-specific life history changes in a moth. *Ecol. Evol.* **4**, 2082–2089. (doi:10.1002/ece3.1090)
32. Bennie J, Davies T, Duffy J, Inger R, Gaston KJ. 2014 Contrasting trends in light pollution across Europe. *Sci. Rep.* **4**, 3789. (doi:10.1038/srep03789)
33. Kuechly HU, Kyba CCM, Ruhtz T, Lindemann C, Wolter C, Fischer J, Hölker F. 2012 Aerial survey of light pollution in Berlin, Germany, and spatial analysis of sources. *Remote Sens. Environ.* **126**, 39–50. (doi:10.1016/j.rse.2012.08.008)
34. Hale JD, Davies G, Fairbrass AJ, Matthews TJ, Rogers CD, Sadler JP. 2013 Mapping lightscapes: spatial patterning of artificial lighting in an urban landscape. *PLoS ONE* **8**, e61460. (doi:10.1371/journal.pone.0061460)
35. Perkin EK, Hölker F, Heller S, Berghahn R. 2014 Artificial light and nocturnal activity in gammarids. *PeerJ* **2**, e279. (doi:10.7717/peerj.279)
36. Kyba CCM, Wagner JM, Kuechly HU, Walker CE, Elvidge CD, Falchi F, Ruhtz T, Fischer J, Hölker F. 2013 Citizen science provides valuable data for monitoring global night sky luminance. *Sci. Rep*. **3**, 1835. (doi:10.1038/srep01835)
37. Aubé M. 2015 Physical behaviour of anthropogenic light propagation into the nocturnal environment. *Phil. Trans. R. Soc. B* **370**, 20140117. (doi:10.1098/rstb.2014.0117)
38. Kyba CCM, Ruhtz T, Fischer J, Hölker F. 2012 Red is the new black: how the colour of urban skyglow varies with cloud cover. *Mon. Notes R.*

Astron. Soc. **425**, 701–708. (doi:10.1111/j.1365-2966.2012.21559.x)
39. Aubé M, Roby J, Kocifaj M. 2013 Evaluating potential spectral impacts of various artificial lights on melatonin suppression, photosynthesis, and star visibility. *PLoS ONE* **8**, e67798. (doi:10.1371/journal.pone.0067798)
40. Dominoni DM, Partecke J. 2015 Does light pollution alter daylength? A test using light loggers on freeranging European blackbirds (*Turdus merula*). *Phil. Trans. R. Soc. B* **370**, 20140118. (doi:10.1098/rstb.2014.0118)
41. Ashkenazi L, Haim A. 2012 Light interference as a possible stressor altering HSP70 and its gene expression levels in brain and hepatic tissues of golden spiny mice. *J. Exp. Biol.* **215**, 4034–4040. (doi:10.1242/jeb.073429)
42. Haim A, Zubidat AE. 2015 Artificial light at night: melatonin as a mediator between the environment and epigenome. *Phil. Trans. R. Soc. B* **370**, 20140121. (doi:10.1098/rstb.2014.0121)
43. Brainard GC, Richardson BA, Hurlbut EC, Steinlechner S, Matthews SA, Reiter RJ. 1984 The influence of various irradiances of artificial light, twilight, and moonlight on the suppression of pineal melatonin content in the Syrian hamster. *J. Pineal Res.* **1**, 105–119. (doi:10.1111/j.1600-079X.1984.tb00202.x)
44. Bedrosian TA, Fonken LK, Walton JC, Nelson RJ. 2011 Chronic exposure to dim light at night suppresses immune responses in Siberian hamsters. *Biol. Lett.* **7**, 468–471. (doi:10.1098/rsbl.2010.1108)
45. Dominoni D, Quetting M, Partecke J. 2013 Artificial light at night advances avian reproductive physiology. *Proc. R. Soc. B* **280**, 20123017. (doi:10.1098/rspb.2012.3017)
46. Poulin C, Bruyant F, Laprise M-H, Cockshutt AM, Vandenhecke JMR, Huot Y. 2013 The impact of light pollution on diel changes in the photophysiology of *Microcystis aeruginosa*. *J. Plankton Res.* **36**, 286–291. (doi:10.1093/plankt/fbt088)
47. Bakken LE, Bakken GS. 1977 American redstart feeding by artificial light. *Auk* **94**, 373–374.
48. Bird BL, Branch LC, Miller DL. 2004 Effects of coastal lighting on foraging behavior of beach mice. *Conserv. Biol.* **18**, 1435–1439. (doi:10.1111/j.1523-1739.2004.00349.x)
49. Santos CD, Miranda AC, Granadeiro JP, Lourenco PM, Saraiva S, Palmeirim JM. 2010 Effects of artificial illumination on the nocturnal foraging of waders. *Acta Oecol.* **36**, 166–172. (doi:10.1016/j.actao.2009.11.008)
50. Becker A, Whitfield AK, Cowley PD, Järnegren J, Næsje TF. 2013 Potential effects of artificial light associated with anthropogenic infrastructure on the abundance and foraging behaviour of estuaryassociated fishes. *J. Appl. Ecol.* **50**, 43–50. (doi:10.1111/1365-2664.12024)
51. Moore MV, Pierce SM, Walsh HM, Kvalvik SK, Lim JD. 2000 Urban light pollution alters the diel vertical migration of Daphnia. *Verh. Intern. Ver. Limnol.* **27**, 779–782.
52. Kuijper DPJ, Schut J, van Dullemen D, Toorman H, Goossens N, Ouwehand J, Limpens HJGA. 2008 Experimental evidence of light disturbance along the commuting routes of pond bats (*Myotis dasycneme*). *Lutra* **51**, 37–49.
53. Stone EL, Jones G, Harris S. 2009 Street lighting disturbs commuting bats. *Curr. Biol.* **19**, 1123–1127. (doi:10.1016/j.cub.2009.05.058)
54. Riley WD, Bendall B, Ives MJ, Edmonds NJ, Maxwell DL. 2012 Street lighting disrupts the diel migratory pattern of wild Atlantic salmon, *Salmo salar* L., smolts leaving their natal stream. *Aquaculture* **330–333**, 74–81. (doi:10.1016/j.aquaculture.2011.12.009)
55. Mathews F, Roche N, Aughney T, Jones N, Day J, Baker J, Langton S. 2015 Barriers and benefits: implications of artificial night-lighting for the distribution of common bats in Britain and Ireland. *Phil. Trans. R. Soc. B* **370**, 20140124. (doi:10.1098/rstb.2014.0124)
56. Evans WR, Akashi Y, Altman NS, Manville II AM. 2007 Response of night-migrating songbirds in cloud to colored and flashing light. *N. Am. Birds* **60**, 476–488.
57. Poot H, Ens BJ, Vries HDe, Donners MAH, Wernand MR, Marquenie JM. 2008 Green light for nocturnally migrating birds. *Ecol. Soc.* **13**, 47.
58. Miller MW. 2006 Apparent effects of light pollution on singing behavior of American robins. *Condor* **108**, 130–139. (doi:10.1650/0010-5422(2006)108 [0130:AEOLPO]2.0.CO;2)
59. Kempenaers B, Borgström P, Löes P, Schlicht E, Valcu M. 2010 Artificial night lighting affects dawn song, extra-pair siring success, and lay date in songbirds. *Curr. Biol.* **20**, 1735–1739. (doi:10.1016/j.cub.2010.08.028)
60. Titulaer M, Spoelstra K, Lange CYMJG, Visser ME. 2012 Activity patterns during food provisioning are affected by artificial light in free living great tits (*Parus major*). *PLoS ONE* **7**, e37377. (doi:10.1371/journal.pone.0037377)
61. Da Silva A, Valcu M, Kempenaers B. 2015 Light pollution alters the phenology of dawn and dusk singing in common European songbirds. *Phil. Trans. R. Soc. B* **370**, 20140126. (doi:10.1098/rstb.2014.0126)
62. de Jong M, Ouyang JQ, Da Silva A, van Grunsven RHA, Kempenaers B, Visser ME, Spoelstra K. 2015 Effects of nocturnal illumination on life-history decisions and fitness in two wild songbird species. *Phil. Trans. R. Soc. B* **370**, 20140128. (doi:10.1098/rstb.2014.0128)

63. Jones J, Francis CM. 2003 The effects of light characteristics on avian mortality at lighthouses. *J. Avian Biol.* **34**, 328–333. (doi:10.1111/j.0908-8857.2003.03183.x)
64. Rodríguez A, Rodríguez B, Curbelo A J, Pérez A, Marrero S, Negro JJ. 2012 Factors affecting mortality of shearwaters stranded by light pollution. *Anim. Conserv*. **15**, 519–526. (doi:10.1111/j.1469-1795.2012.00544.x)
65. Rosenthal R. 1979 The 'file drawer problem' and tolerance for null results. *Psychol. Bull*. **86**, 638–641. (doi:10.1037/0033-2909.86.3.638)
66. Spoelstra K, Visser ME. 2013 The impact of artificial light on avian ecology. In *Avian urban ecology* (eds D Gil, H Brumm), pp. 21–28. Oxford, UK: OUP.
67. Hölker F, Wurzbacher C, Weißenborn C, Monaghan MT, Holzhauer SIJ, Premke K. 2015 Microbial diversity and community respiration in freshwater sediments influenced by artificial light at night. *Phil. Trans. R. Soc. B* **370**, 20140130. (doi:10.1098/rstb.2014.0130)
68. Bennie J, Davies TW, Cruse D, Inger R, Gaston KJ. 2015 Cascading effects of artificial light at night: resource-mediated control of herbivores in a grassland ecosystem. *Phil. Trans. R. Soc. B* **370**, 20140131. (doi:10.1098/rstb.2014.0131)
69. Gaston KJ, Bennie J, Davies TW, Hopkins J. 2013 The ecological impacts of nighttime light pollution: a mechanistic appraisal. *Biol. Rev*. **88**, 912–927. (doi:10.1111/brv.12036)
70. Jones TM, Durrant J, Michaelides EB, Green MP. 2015 Melatonin: a possible link between the presence of artificial light at night and reductions in biological fitness. *Phil. Trans. R. Soc. B* **370**, 20140122. (doi:10.1098/rstb.2014.0122)
71. Spoelstra K, van Grunsven RHA, Donners M, Gienapp P, Huigens ME, Slaterus R, Berendse F, Visser ME, Veenendaal E. 2015 Experimental illumination of natural habitat—an experimental set-up to assess the direct and indirect ecological consequences of artificial light of different spectral composition. *Phil. Trans. R. Soc. B* **370**, 20140129. (doi:10.1098/rstb.2014.0129)
72. Stevens RG, Zhu Y. 2015 Electric light, particularly at night, disrupts human circadian rhythmicity: is that a problem? *Phil. Trans. R. Soc. B* **370**, 20140120. (doi:10.1098/rstb.2014.0120)
73. Stone EL, Wakefield A, Harris S, Jones G. 2015 The impacts of new street light technologies: experimentally testing the effects on bats of changing from low-pressure sodium to white metal halide. *Phil. Trans. R. Soc. B* **370**, 20140127. (doi:10.1098/rstb.2014.0127)
74. Eisenbeis G. 2006 Artificial night lighting and insects: attraction of insects to streetlamps in a rural setting in Germany. In *Ecological consequences of artificial night lighting* (eds C Rich, T Longcore), pp. 281–304. Washington, DC: Island Press.
75. Longcore T, Aldern HL, Eggers JF, Flores S, Franco L, Hirshfield-Yamanishi E, Petrinec LN, Yan WA, Barroso AM. 2015 Tuning the white light spectrum of light emitting diode lamps to reduce attraction of nocturnal arthropods. *Phil. Trans. R. Soc. B* **370**, 20140125. (doi:10.1098/rstb.2014.0125)
76. Davies TW, Bennie J, Gaston KJ. 2012 Street lighting changes the composition of invertebrate communities. *Biol. Lett*. **8**, 764–767. (doi:10.1098/rsbl.2012.0216)
77. Perkin EK, Hölker F, Tockner K, Richardson JS. 2014 Artificial light as a disturbance to light- na¨ıve streams. *Freshwater Biol*. **59**, 2235–2244. (doi:10.1111/fwb.12426)
78. Gaston KJ, Bennie J. 2014 Demographic effects of artificial nighttime lighting on animal populations. *Environ. Rev*. **22**, 1–8. (doi:10.1139/er-2014-0041)
79. Buchanan BW. 1993 Effects of enhanced lighting on the behaviour of nocturnal frogs. *Anim. Behav*. **45**, 893–899. (doi:10.1006/anbe.1993.1109)
80. Heiling AM. 1999 Why do nocturnal orb-web spiders (Araneidae) search for light? *Behav. Ecol. Sociobiol.* **46**, 43–49. (doi:10.1007/s002650050590)
81. Longcore T, Rich C. 2004 Ecological light pollution. *Front. Ecol. Environ*. **2**, 191–198. (doi:10.1890/ 1540-9295(2004)002[0191:ELP]2.0.CO;2)
82. Rich C, Longcore T (eds). 2006 *Ecological consequences of artificial night lighting*. Washington, DC: Island Press.
83. Perkin EK, Hölker F, Richardson JS, Sadler JP, Wolter C, Tockner K. 2011 The influence of artificial light on stream and riparian ecosystems: questions, challenges, and perspectives. *Ecosphere* **2**, 122. (doi:10.1890/ES11-00241.1)
84. Health Council of the Netherlands. *2000 Impact of outdoor lighting on man and nature. Publication No. 2000/25E.* The Hague, The Netherlands: Health Council of the Netherlands.
85. The Royal Commission on Environmental Pollution. 2009 *Artificial light in the environment.* London, UK: TSO.
86. US Department of Energy. 2012 *Light at night: the latest science*. See http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/sslwhitepaper_nov2010.pdf.
87. Gaston KJ. 2013 A green light for efficiency. *Nature* **497**, 560–561. (doi:10.1038/497560a)
88. Kyba CCM, Ha¨nel A, Hölker F. 2014 Redefining efficiency for outdoor lighting. *Energy Environ. Sci.* **7**, 1806–1809. (doi:10.1039/c4ee00566j)
89. Falchi F, Cinzano P, Elvidge CD, Keith DM, Haim A. 2011 Limiting the impact of light pollution on human health, environment and stellar visibility. *J. Environ. Manage*. **92**, 2714–2722. (doi:10.1016/j.jenvman.2011.06.029)