فصلنامه علوم محیطی، دوره بیست و یکم، شماره ۳، پائیز ۱۴۰۲

۱۴۸-۱۳۱

مقاله پژوهشی

ارزیابی اثرات توسعه شهری بر ظرفیت برد بوم‌شناختی شهر اصفهان بر اساس رویکرد پویایی سیستم

زهرا دهقان منشادی و پرستو پریور*

گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و کویرشناسی، دانشگاه یزد ، یزد، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۲/۶

دهقان منشادی، ز. و پ. پریور. ۱۴۰۲. ارزیابی اثرات توسعه شهری بر ظرفیت برد بوم‌شناختی شهر اصفهان بر اساس رویکرد پویایی سیستم. فصلنامه علوم محیطی. ۲۱(۳): ۱۳۱-۱۴۸.

سابقه و هدف: مدیریت سیستم‌های اجتماعی و بوم‌شناختی مانند شهرها، به دلیل وابستگی زیرسیستم‌ها به یکدیگر، روابط علت و معلولی بین آن‌ها و همچنین تأثیرات بر پایداری، بسیار پیچیده است. اهمیت ظرفیت و توان بوم‌شناختی در شهرها برای حفظ قابلیت آن‌ها در ارائه کالاها و خدمات هم برای نسل کنونی و هم برای نسل‌های آینده اهمیت دارد. درک چگونگی پاسخ بوم‌سازگان‌های خشک در برابر اختلالات با توجه به وسعتی که تحت اشغال خود دارند و شکنندگی آن‌ها، چه ازنظر ساختاری و چه ازنظر عملکردی، برای مدیریت پایدار این مناطق از اهمیت بالایی برخوردار است. هدف پژوهش حاضر ارزیابی اثرات توسعه شهری بر ظرفیت برد شهر اصفهان است. در این راستا، استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی می‌تواند ابزار مؤثری در ارائه تصمیمات علمی در برخورد با سیستم‌های اجتماعی و بوم‌شناختی پیچیده و ناشناخته باشد.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش از مدل‌سازی پویایی سیستم و تحلیل ساختار سیمای سرزمین برای تعیین روابط علت و معلولی بین متغیرهای اثرگذار و اثرپذیر بر ظرفیت برد شهر اصفهان استفاده شده است. به‌منظور بررسی ساختار سیمای سرزمین، متریک‌های DIVISION، SPLIT و IJI برای نشان دادن پیوستگی و متریک‌های ED، SHDI و AI برای مشخص کردن وضعیت ناهمگنی سیمای سرزمین شهر اصفهان به‌کاربرده شده‌اند. در اولین گام از فرایند مدل‌سازی بعد از طرح مسئله، تعریف مرز مدل با ترسیم نمودار زیرسیستم‌ها انجام شد. زیرسیستم‌های جمعیت، محیط زیست، سیمای سرزمین و ظرفیت برد در نظر گرفته شد. در گام بعد، نمودار علت و معلولی به‌گونه‌ای رسم شد که بیانگر ساختار بازخوردی سیستم باشد. سپس با ایجاد نمودار جریان و سناریوسازی، وضعیت ظرفیت برد شهر اصفهان ارزیابی شد. به‌منظور اعتبارسنجی مدل نیز روند تاریخی و شبیه‌سازی دو متغیر جمعیت شهری و تعداد صنایع با استفاده از ضریب تبیین

* Corresponding Author: *Email Address*. parivar.p@yazd.ac.ir
http://dx.doi.org/10.48308/envs.2023.1269
http://dorl.net/dor/20.1001.1.17351324.1402.21.3.6.6
Copyright: © 2023 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

مقایسه شده است.

نتایج و بحث: در این پژوهش متغیرهای کلیدی در سیستم مانند نسبت تولید به مصرف آب که نشان‌دهنده پایداری منابع آب است و کیفیت هوا تجزیه و تحلیل شد. با تحلیل تغییرات ساختار سیمای سرزمین، به‌وسیله متریک‌های سیمای سرزمین، عوامل فشار روی ظرفیت برد شهر اصفهان، شناسایی و سپس بر اساس مدل توسعه داده شده، ارزیابی شد. یافته‌های پژوهش نشان داد، حدود ۹۰ درصد مصرف آب در این شهر مربوط به مصرف خانگی است، بنابراین سناریوی اول مربوط به کنترل مصرف آب در این بخش و تأثیر آن بر شاخص نسبت تولید به مصرف آب می‌باشد. این سناریو نشان داد، چنانچه مصرف آب در بخش خانگی کنترل نشود مقدار این شاخص تا سال ۲۰۴۰ به نزدیک ۰/۷ خواهد رسید که نشان‌دهنده افزایش آسیب‌پذیری منابع آب در این منطقه است. سناریوی دوم مربوط به کنترل روند افزایش ساخت و سازها و تعداد صنایع در شهر است که تأثیر آن بر ظرفیت برد نشان داده شده است.

نتیجه‌گیری: نتایج پژوهش حاضر، بر اساس دو سناریوی بسط داده‌شده، نشان داد که ظرفیت برد شهر اصفهان به‌شدت تحت تأثیر مصرف آب، تغییرات ساختار سیمای سرزمین شهری و رشد صنایع است. به‌طوری‌که با کنترل و مدیریت مصرف آب در بخش خانگی، ایجاد محدودیت در رشد صنایع، جلوگیری از تخریب باغات، گسترش فضاهای سبز و باز شهری و پیشگیری از رشد سطوح نفوذ ناپذیر شهری، ظرفیت برد شهر اصفهان شرایط بهتری پیدا خواهد کرد.

واژه‌های کلیدی: ظرفیت برد شهری، تفکر سیستمی، ساختار و عملکرد سیمای سرزمین، بوم‌سازگان‌های خشک.

مقدمه

یکی از مشکلات جهان امروز، رشد کلان‌شهرها است. در سال ۱۹۶۰، تنها ۳۳/۶۲ درصد از جمعیت جهان شهرنشین بودند اما این رقم در سال ۲۰۲۰ به ۵۶/۱۵ درصد رسیده است (World Bank, 2021). پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۵۰، ۶۸ درصد از جمعیت جهان در شهرها ساکن باشند (United Nations, 2019). میزان شهرنشینی در ایران نیز از ۳۱/۴ درصد در سال ۱۳۳۵ به ۷۴ درصد در سال ۱۳۹۵ رسیده است (Statistical center, 2016). درحالی‌که تنها حدود ۲ درصد از مساحت زمین به شهرها اختصاص دارد، ۷۵ درصد از منابع جهان را مصرف می‌کنند(Madlener and Sunak, 2011). عواملی مانند اشتغال‌زایی، امنیت غذایی، دسترسی به خدمات ضروری (مسکن، آب، بهداشت، آموزش)، توسعه فضای سبز و مدیریت پسماند و فاضلاب موجب شده تا شهرها به‌تدریج به سیستم‌های اجتماعی و بوم‌شناختی پیچیده‌تری تبدیل شوند. با افزایش مستمر متغیرهایی مانند وسعت، جمعیت و پیچیدگی در شهرها، آسیب‌پذیری آن‌ها در برابر حوادث و مخاطرات افزایش می‌یابد که می‌تواند زمینه‌ی بروز آشفتگی‌های اجتماعی باشد (Ribeiro and Gonçalves, 2019; X. Zhang and Li, 2018). بنابراین، پاسخ‌های سیاسی باید متناسب با شرایط محلی بوده و ابزارهایی را برای دستیابی به شهرنشینی تاب آور و پایدار فراهم کند. از مهم‌ترین ابعاد مؤثر بر پایداری شهری، مقوله ظرفیت برد است. از اواخر دهه ۱۹۶۰ بحث‌هایی حول محور ظرفیت برد و نگرانی درباره شرایط زندگی انسان‌ها در شهرها آغاز شد (Seidl and Tisdell, 1999). با توجه به ارتباط متقابل میان ساختار و عملکرد در سیمای سرزمین در شهرها، درصورتی‌که افزایش جمعیت انسانی و به دنبال آن مساحت فضاهای ساخته‌شده و دیگر آثار رشد شهرها، از حد پشتیبانی سیستم پشتیبان حیات شهر فراتر رود، سیستم شهری دیگر قادر به پشتیبانی از تولید خدمات و تنظیم فرایندهای بوم‌شناختی نبوده و درنتیجه قدرت پالایش، دسترسی شهروندان به خدماتی مانند آب، خاک و هوای پاکیزه کاهش می‌یابد (Dehghan Manshadi *et al.*, 2023). بنابراین لازم است حد رشد شهر با ظرفیت برد بوم‌شناختی آن هماهنگ شود. در دوره‌های اولیه رشد، ازآنجاکه شهر نماد رفاه و ثروت است، جمعیت و فعالیت‌های انسانی را به خود جذب می‌کند. بعد از مدتی با کاهش ظرفیت برد و به دنبال آن، پایین

آمدن کیفیت زندگی، از حس رضایت شهروندان کاسته می‌شود و آن‌ها با چالش‌هایی نظیر ناراحتی‌های فیزیکی و ذهنی روبه‌رو خواهند شد (Mao *et al.*, 2020). ازاین‌رو، ارزیابی محدوده رشد شهرها بر اساس ظرفیت سیستم پشتیبان حیات شهر، در راستای ارتقاء پایداری و تاب‌آوری شهری اهمیت دارد. بررسی رویکردهای جدید شهرهای تاب آور و تأمین ظرفیت برد حیاتی شهر، نشان می‌دهد که به دنبال ارائه خدمات اجتماعی برای بهبود کیفیت زندگی انسان که به نوبه خود جزء کلیدی توسعه پایدار است، سیستم پشتیبان حیات شهری باید تقویت شود. مفهوم شهر پایدار با جنبه‌هایی مانند میزان فضای سبز عمومی به ازای هر شهروند و پارک‌های عمومی به‌عنوان عوامل مهم برای زیست‌پذیری و جذابیت شهری، تعریف‌شده است (Chiesura, 2004). درنتیجه ظرفیت سیستم پشتیبان حیات شهری با توسعه ساختارهای سبز و باز شهری ارتباط تنگاتنگ دارد (Parivar *et al.*, 2020). ازاین‌رو، در مطالعات مرتبط با پایداری شهری، درک تأثیرات متقابل بین عناصر ساختاری و عملکردی در شهرها برای پیش‌بینی اثرات هر طرح و برنامه و پیشنهاد برنامه‌هایی بهتر در جهت ارتقای فضای سبز به‌عنوان پشتیبان سیستم‌های حیاتی شهر اهمیت دارد (Dehghan Manshadi *et al.*, 2023). یافته‌های اخیر دانشمندان در این حوزه نشان می‌دهد، روش‌های پیشین مانند برنامه‌ریزی خطی نمی‌تواند رفتار غیرخطی و عدم قطعیت‌ها در سیستم‌های زیستی را منعکس کند، بنابراین در مطالعات به‌منظور نشان دادن روابط علت - معلولی میان زیرسیستم‌ها و تحلیل تغییرات ساختار شهری از رویکرد پویایی سیستم استفاده‌شده است. برای مثال Zhang *et al.* (2017) متریک‌های تقسیم‌شدگی[1]، تعداد لکه‌ها[2] و میانگین مساحت لکه[3] را برای نشان دادن پیوستگی سیمای سرزمین در مدل‌سازی پویایی سیستم به‌کاربرده‌اند. در پژوهش دیگری Xu *et al.* (2015) به‌منظور بررسی رشد صنعت در چین و تأثیر آن بر عملکرد بوم‌شناختی سیمای سرزمین با استفاده از رویکرد پویایی سیستم پنج زیرسیستم صنعت، جمعیت، اقتصاد شهری، محیط زیست و سیمای سرزمین را تعریف کردند و در زیرسیستم سیمای سرزمین از متریک‌های تنوع شانون[4]، نزدیک‌ترین فاصله همسایگی اقلیدسی[5] و تراکم لبه[6] برای نشان دادن ناهمگنی استفاده کردند. در همین راستا تعدادی از مطالعات با تعریف شاخصی به نام سازمان‌دهی بوم‌سازگان[7] به ارزیابی پایداری و ثبات ساختار سیمای سرزمین پرداختند. این شاخص با محاسبه ناهمگنی و پیوستگی سیمای سرزمین تفسیر می‌شود (Yang *et al.*, 2020; Yushanjiang *et al.*, 2021).

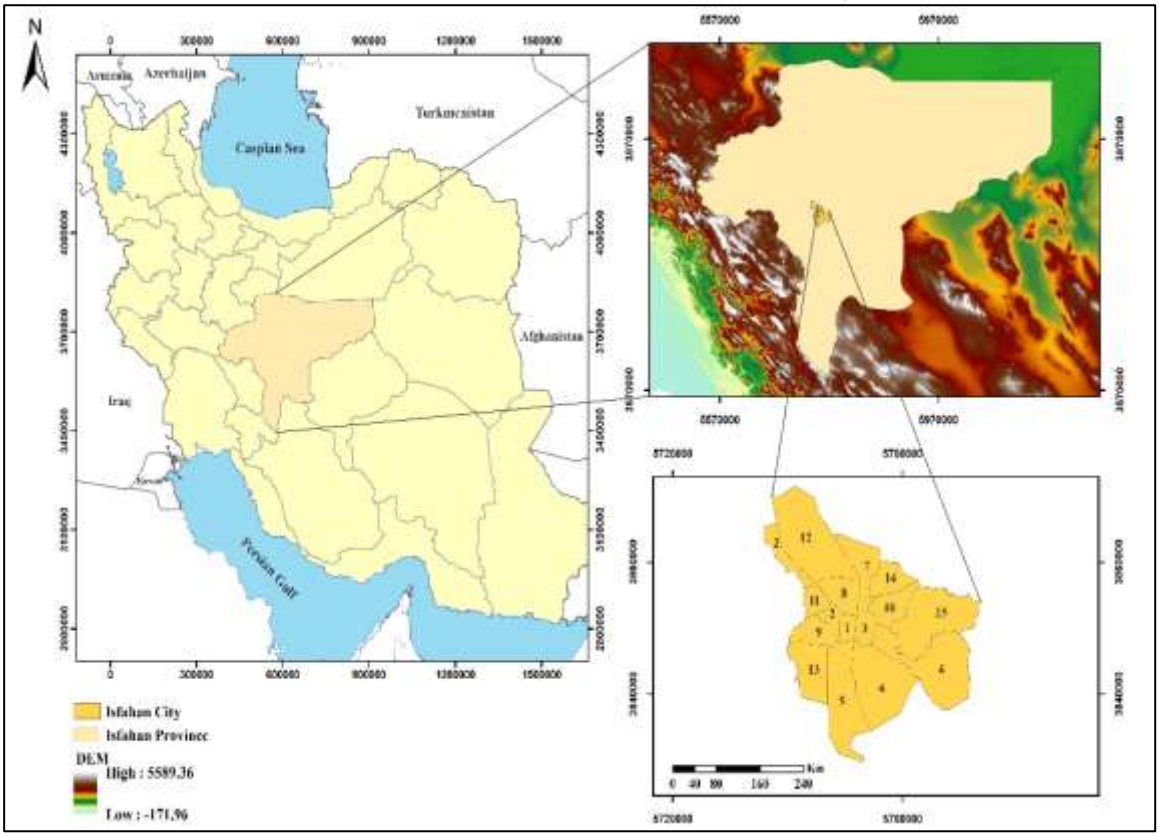
اصفهان شهری در فلات مرکزی ایران و دارای اقلیمی خشک است که باوجود محدودیت‌های طبیعی، روند رو به رشدی را در سطوح نفوذناپذیر شهری و گسترش صنعت تجربه کرده است (Habibi *et al.*, 2020). با توجه به وسعت بوم‌سازگان‌های خشک (۴۱/۳ درصد از مساحت زمین)، درک چگونگی پاسخ آن‌ها به تغییرات برای مدیریت پایدار از اهمیت بالایی برخوردار است (Wei *et al.*, 2021). تخریب پوشش اراضی و بهره‌برداری بیش‌ازحد از منابع آبی بوم‌سازگان‌های خشک می‌تواند منجر به بیابان‌زایی، تشدید تنش‌های اجتماعی مرتبط با فقر، قحطی، حاشیه‌نشینی، مهاجرت و بی‌ثباتی سیاسی شود و درنهایت تاب‌آوری این مناطق تحت تأثیر قرار خواهد گرفت (Porras *et al.*, 2020).

در پژوهش حاضر سعی شده است که اثرات توسعه شهری بر ظرفیت برد بوم‌شناختی شهر اصفهان با استفاده از تلفیق دو روش تحلیل ساختاری و درک روابط علت و معلولی مورد ارزیابی قرار گیرد. این مطالعه در راستای پاسخ به این سؤالات انجام‌شده است: ۱. رشد و گسترش شهرنشینی چه تأثیری بر ساختار سیمای سرزمین شهر اصفهان داشته است؟ ۲. تغییرات ساختاری چگونه بر کیفیت و کمیت ظرفیت برد بوم‌شناختی شهر اصفهان تأثیر گذاشته است؟

مواد و روش‌ها

منطقه موردپژوهش

شهر اصفهان، سومین کلان‌شهر پرجمعیت ایران است که با طول جغرافیایی ۵۱ درجه و ۳۹ دقیقه و ۴۰ ثانیه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۲ درجه و ۳۸ دقیقه و ۳۰ ثانیه شمالی، در مرکز ایران و جنوب غربی استان اصفهان قرارگرفته است(Niliyeh Brojeni and Ahmadi Nadoushan, 2019). این شهر با پانزده منطقه شهری و مساحتی حدود ۵۵۰ کیلومتر مربع در زمره وسیع‌ترین شهرهای خشک و کم‌باران دنیا قرار دارد و بر اساس طبقه‌بندی دومارتن دارای اقلیم فراخشک سرد است. میانگین دمای سالانه ۱۶/۴ درجه سانتی‌گراد و میانگین بارش سالانه ۱۲۷ میلی‌متر است(Shamsaie *et al.*, 2022). در شکل ۱ موقعیت مکانی شهر اصفهان نمایش داده شده است.



شکل ۱- موقعیت مکانی شهر اصفهان

Fig. 1- Location of Isfahan City

در پژوهش حاضر از مدل پویایی سیستم و ارزیابی ساختار سیمای سرزمین برای تعیین اثرات توسعه شهری بر ظرفیت برد شهر اصفهان استفاده شده است.

مدل پویایی سیستم

در اواخر دهه‌ی ۱۹۵۰، پویایی سیستم، به‌عنوان رویکردی بین‌رشته‌ای توسط پروفسور فارستر از انستیتوی فناوری ماساچوست معرفی شد (Coyle, 1997). Sterman (2011) عنوان می‌کند مدل‌های ذهنی محدود و ایستای ما برای سیستم‌های پیچیده اجتماعی و بوم‌شناختی منجر به راه حل‌های مقطعی می‌شود. چنین رویکردهایی می‌تواند با تأخیر، پیامدهای جبران ناپذیری (بدون بازگشت) را در مقیاس‌های جهانی و محلی رقم بزند. مزیت پویایی سیستم در این است که با ردیابی تغییر الگوهای رفتاری در طول زمان، فرایندی خطی از مراحل را دنبال نمی‌کند و طی مسیر از طریق بازخوردها، تکرار و

پرسش مداوم، موجب درک بهتر متخصصان و برنامه-ریزان نسبت به مسئله مورد پژوهش می‌شود (Sterman, 2000). فرایند انجام پژوهش بر اساس مدل پویایی سیستم به شرح زیر است. در مرحله نخست از فرایند مدل‌سازی، زیرسیستم‌های مؤثر بر ظرفیت برد اصفهان تعیین شد (شکل ۲). در مرحله دوم، با شناسایی متغیرهای اثرگذار بر ظرفیت برد شهر اصفهان، حلقه‌های علت - معلولی در نرم‌افزار ونسیم[8] تعریف شده است (شکل ۱۰). نمودارهای علی و معلولی ساختار بازخوردی سیستم را نشان می‌دهند. حلقه‌های تقویت‌کننده[9] با حرف R نشان داده شده که به‌عنوان محرک رشد توصیف می‌شود. در این لوپ‌ها شتاب تغییرات، چه در جهت مثبت و چه در جهت منفی، پی‌درپی بیشتر خواهد شد. حلقه‌های متعادل‌کننده (B)[10] موجب خودتنظیمی سیستم در شرایط مختلف شده و تعادلی پایدار را ایجاد می‌کنند (Li *et al.*, 2020). مرحله سوم از فرایند مدل‌سازی، رسم نمودار حالت - جریان در نرم‌افزار ونسیم است. تمرکز این نمودار بر ساختارهای فیزیکی ایجادکننده‌ی فرایند بازخوردی (نمودار علی و معلولی) است. در نمودار حالت - جریان، نقش متغیرهای حالت[11] مشخص نمودن اطلاعاتی است که تصمیم‌گیری بر پایه آن انجام خواهد شد (Francis and Thomas, 2022). تعداد جمعیت، مساحت زمین سبز، باز و ساخته‌شده نمونه‌هایی از متغیرهای حالت است. کاربرد متغیر جریان، نشان دادن نرخ تغییر وضع موجود در سیستم است (Ravar *et al.*, 2020). نرخ زاد و ولد، مرگ و میر و نرخ رشد صنعت نمونه‌هایی از این متغیر است.

اعتبار سنجی مدل پویایی سیستم

اعتبارسنجی، یکی از مراحل مهم در فرایند مدل‌سازی است. به دلیل عدم قطعیت‌های فراوان، هیچ مدلی نمی‌تواند کاملاً معتبر باشد و مدل‌ها نمونه‌های ساده شده‌ای از شرایط دنیای واقعی هستند. یکی از روش‌های مورداستفاده برای ارزیابی اعتبار مدل، مقایسه نتیجه شبیه‌سازی متغیرها با داده‌های مرجع است (Sterman, 2000). در پژوهش حاضر برای اعتبارسنجی از مقایسه روند تاریخی و شبیه‌سازی متغیرهای جمعیت شهری و تعداد صنایع با استفاده از ضریب تبیین استفاده شده است.

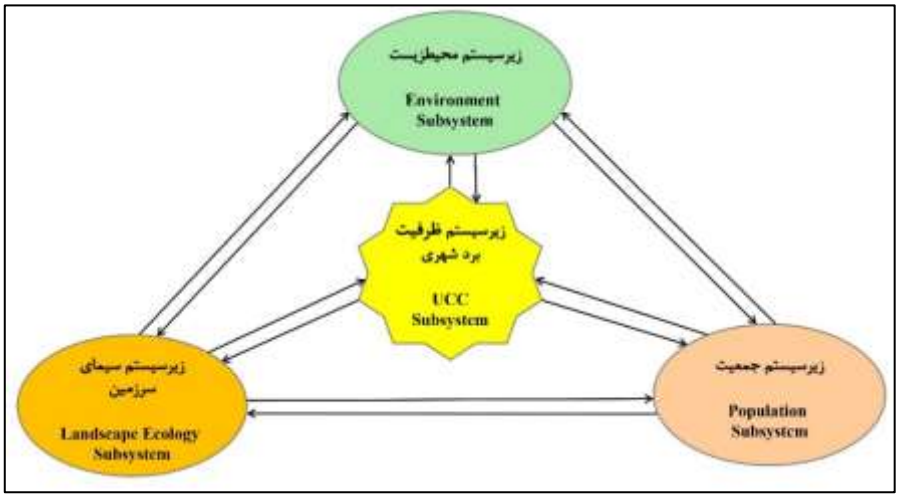
تحلیل ساختار سیمای سرزمین شهر اصفهان

در این پژوهش برای نشان دادن تغییرات ساختار شهری از دو معیار پیوستگی و ناهمگنی سیمای سرزمین استفاده‌شده است. متریک‌های DIVISION، SPLIT و IJI برای نشان دادن پیوستگی و متریک‌های ED، SHDI و AI برای مشخص کردن وضعیت ناهمگنی سیمای سرزمین شهر اصفهان به‌کاربرده شده‌اند. اگر سیمای سرزمین فقط شامل یک نوع لکه باشد، متریک SHDI برابر صفر است و با افزایش تعداد انواع لکه افزایش می‌یابد. متریک AI نشان-دهنده گردآمدگی است و مقادیر بالاتر آن بیانگر انتشار ضعیف انواع لکه می‌باشد. هر چه مقدار متریک ED بیشتر باشد، خرد دانگی بالاتر است. افزایش متریک‌های DIVISION و SPLIT نیز نشان‌دهنده خرد دانگی بیشتر است. متریک IJI مجاورت لکه‌ها را می‌سنجد و کاهش آن نشان‌دهنده پراکندگی ضعیف انواع لکه‌ها در سیمای سرزمین است (Dehghan Manshadi *et al.*, 2023; Zou *et al.*, 2022). این متریک‌ها بر اساس نقشه‌های پوشش اراضی (در سه دوره زمانی) به‌دست‌آمده از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۵ (۱۴ اوت ۱۹۹۵ و یک اوت ۲۰۰۸) سنجنده TM و لندست ۸ (۱۸ اوت ۲۰۲۰) سنجنده OLI در نرم‌افزار FRAGSTAT محاسبه‌شده است.

نتایج و بحث

نمودار زیرسیستم‌ها

در پژوهش حاضر، چهار زیرسیستم مؤثر بر ظرفیت برد شهری شامل زیرسیستم‌های جمعیت، محیط‌زیست، سیمای سرزمین و ظرفیت برد تشخیص داده شده است (شکل ۲).

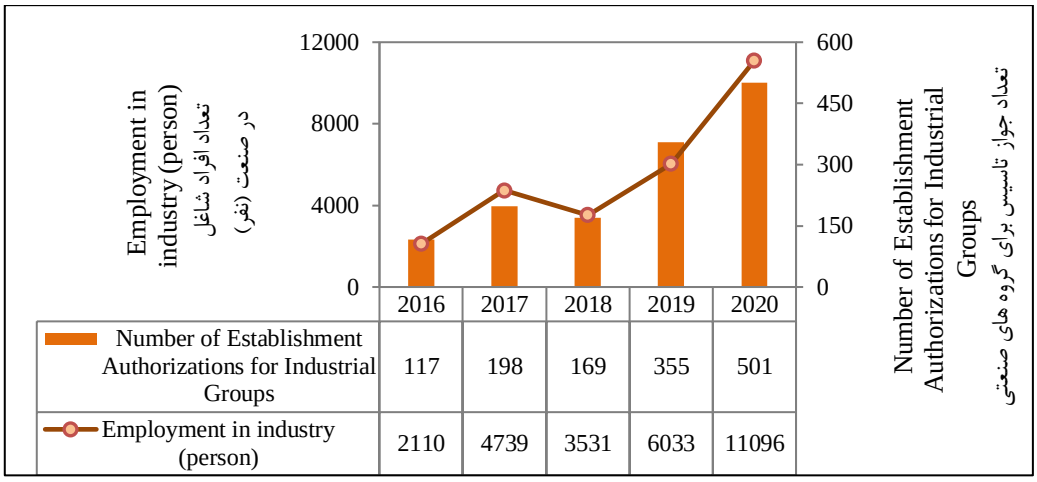


شکل ۲- نمودار زیرسیستم‌های مؤثر بر ظرفیت برد شهر اصفهان

Fig. 2- Isfahan's carrying capacity subsystem diagram

زیرسیستم جمعیت

جمعیت شهر اصفهان با نرخ رشد ۲۱/۱۵ درصد از ۲۸۷۸۹۸ نفر در سال ۱۳۳۵ به ۱۹۶۱۲۶۰ نفر در سال ۱۳۹۵ رسیده است. این افزایش به‌ویژه در حاشیه شهر اصفهان رخ داده که با آسیب‌های محیط‌زیستی، اجتماعی و اقتصادی متعدد می‌تواند بر ظرفیت برد این شهر اثرگذار باشد (Nooraie and Shafi, 2020). از عوامل جاذب جمعیت در این شهر می‌توان به کانون‌های عمده فعالیت صنعتی اشاره کرد که با فراهم کردن شغل و درآمد بیشتر موجب تمرکز جمعیت می‌شود (Isfahan Provincial Government, 2013). از سال ۱۳۹۵ تا ۱۳۹۹، تعداد جواز تأسیس برای گروه‌های صنعتی و تعداد افراد شاغل در صنعت به ترتیب نرخ رشد ۱۵/۶۶ و ۱۸/۰۶ درصدی داشته است (Isfahan Municipality, 2020) (شکل ۳).

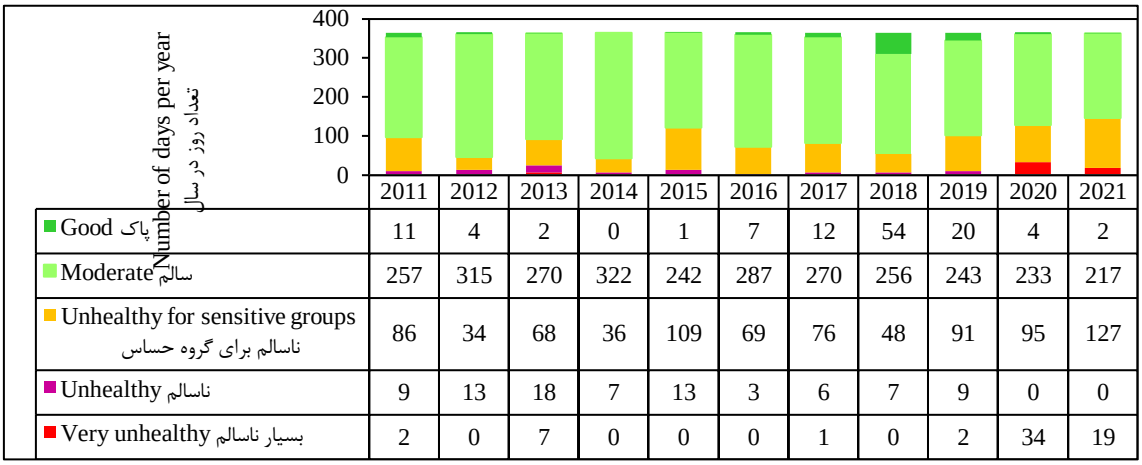


شکل ۳- رشد صنعت در شهر اصفهان در سال‌های ۱۳۹۵ تا ۱۳۹۹

Fig. 3- Growth industry in Isfahan (2016 to 2020)

زیرسیستم محیط زیست

در این زیرسیستم، برای نشان دادن وضعیت زیرسیستم محیط زیست از معیارهایی نظیر آلودگی هوا و آب استفاده شده است. طی سال‌های اخیر، آلودگی هوا در شهر اصفهان به مسئله‌ای جدی تبدیل‌شده است. مطابق شکل ۴، تعداد روزهای پاک در این شهر از ۱۱ روز در سال ۱۳۹۰ به ۲ روز در سال ۱۴۰۰ و تعداد روزهای سالم نیز از ۲۵۷ روز در سال ۱۳۹۰ به ۲۱۷ روز در سال ۱۴۰۰ تغییر کرده است. همچنین تعداد روزهای بسیار ناسالم و ناسالم برای گروه حساس روندی افزایشی را نشان می‌دهد (Isfahan Department of Environment, 2021).

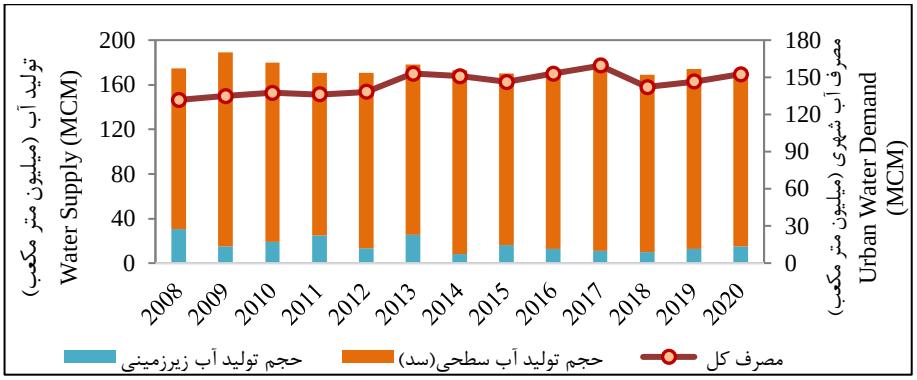


	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Good پاک	11	4	2	0	1	7	12	54	20	4	2
Moderate سالم	257	315	270	322	242	287	270	256	243	233	217
Unhealthy for sensitive groups ناسالم برای گروه حساس	86	34	68	36	109	69	76	48	91	95	127
Unhealthy ناسالم	9	13	18	7	13	3	6	7	9	0	0
Very unhealthy بسیار ناسالم	2	0	7	0	0	0	1	0	2	34	19

شکل ۴- وضعیت کیفیت هوای شهر اصفهان در سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۴۰۰

Fig. 4- Air quality in Isfahan (2011 to 2021)

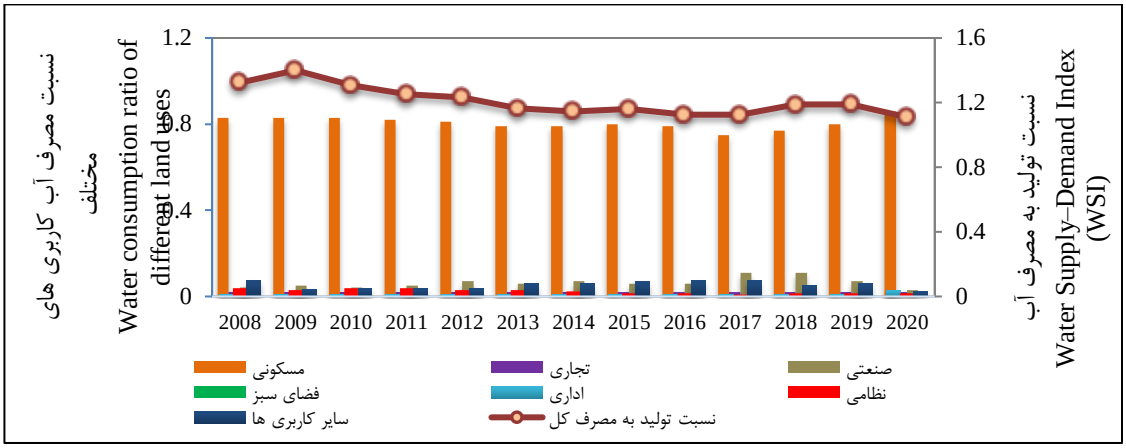
از دیگر اثرات مهم توسعه شهری و تراکم جمعیت به‌ویژه در بوم‌سازگان‌های خشک مانند شهر اصفهان، فشار بر منابع آب است. مطابق شکل ۵، میزان مصرف آب از ۱۳۱/۷۳ میلیون مترمکعب در سال ۱۳۸۷ به ۱۵۲/۴۴ میلیون مترمکعب در سال ۱۳۹۹ رسیده است (Isfahan Municipality, 2020). بنابراین مصرف آب در این بازه زمانی ۱۵/۷۲ درصد افزایش‌یافته است. حجم تولید آب زیرزمینی از ۳۰/۷ میلیون مترمکعب در سال ۱۳۸۷ به ۱۴/۹ میلیون متر مکعب در سال ۱۳۹۹ کاهش یافته است. به‌طوری‌که این مقدار در سال ۱۳۹۳ به ۸/۲ میلیون متر مکعب نیز رسیده است و می‌تواند گویای کاهش تغذیه آب زیرزمینی به دلیل بهره‌برداری بیشتر از ظرفیت برد این منابع باشد.



شکل ۵- تأمین و تقاضای آب در شهر اصفهان طی سال‌های ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۹

Fig. 5- Water supply and demand, Isfahan (2008 to 2020)

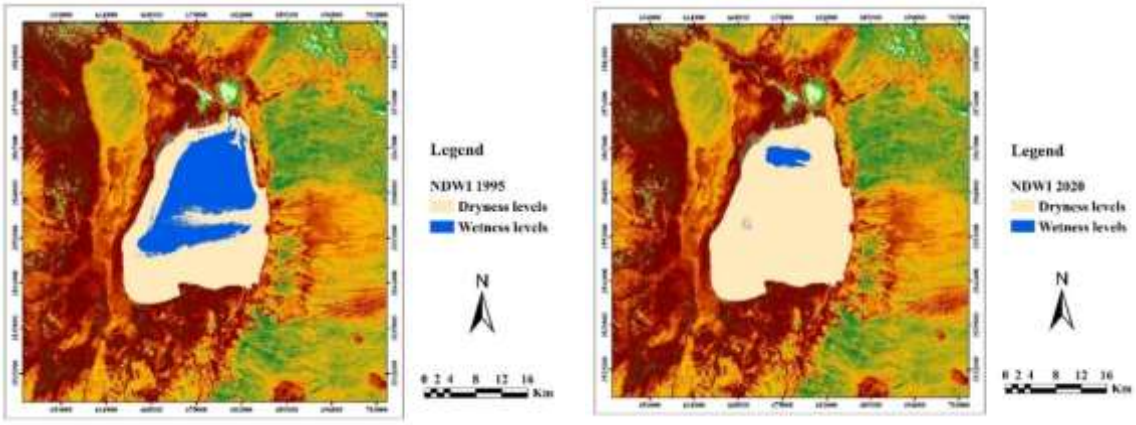
در پژوهش حاضر، به‌منظور ارزیابی آسیب‌پذیری منابع آب شهر اصفهان، شاخص نسبت تولید به مصرف با استفاده از مقادیر شکل ۵ در یک دوره ۱۲ ساله بررسی‌شده است. با کاهش مقدار این شاخص طی زمان، آسیب‌پذیری منابع آب در حال افزایش است و مقادیر کمتر از ۰/۱ بیانگر این است که تأمین آب نمی‌تواند جوابگوی میزان تقاضای جامعه باشد(Wu et al., 2013). مطابق شکل ۶، حداکثر WSI در سال ۱۳۸۸ مقدار ۱/۴ بوده و در سال ۱۳۹۹ به ۱/۱ یعنی کمترین مقدار در این بازه زمانی می‌رسد که نشان‌دهنده افزایش آسیب‌پذیری منابع آب است. مقدار مصرف آب در بخش مسکونی نیز در سال ۱۳۹۹ از تمام سال‌های پیشین بیشتر بوده و نسبت مصرف آن در مقایسه با دیگر کاربری‌ها به ۰/۹ رسیده است (Isfahan Municipality, 2020). بنابراین هرچند تأمین آب در شهر اصفهان هنوز جوابگوی تقاضا است اما نوسان WSI بین ۱/۱ و ۱/۲ از سال ۱۳۹۱ نشان می‌دهد، میزان آب مازاد بسیار محدود است.



شکل ۶- نسبت تولید به مصرف و نسبت مصرف آب هر کاربری در شهر اصفهان طی سال‌های ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۹

Fig. 6- WSI and Water consumption ratio of consumers, Isfahan (2008 to 2020)

مطابق شکل ۷، با توجه به ارزش زیست‌محیطی تالاب‌ها در مناطق خشک، از سنجه تفاضل بهنجار آب (NDWI) برای ردیابی تغییرات هیدرولوژیکی تالاب گاوخونی استفاده شده که یکی از کاربردی‌ترین سنجه‌ها در این زمینه است (Amiri *et al.*, 2021; Javadi *et al.*, 2020). این بوم-سازگان در نقطه انتهایی رودخانه زاینده‌رود قرارگرفته و نقش مؤثری در پایداری شرایط اقلیمی، پالایش آب، تثبیت تپه‌های ماسه‌ای واقع در اطراف تالاب دارد. متأسفانه رشد جمعیت و عدم مدیریت منابع آب منجر به قطع آب ورودی تالاب شده و این بوم‌سازگان طبیعی به نمک‌زار تبدیل‌شده است. شکل۵ نشان می‌دهد که به دنبال پایین رفتن سطح آب‌های زیرزمینی و فشار روی منابع آب سطحی در حوضه آبخیز (سد زاینده‌رود)، حقابه تالاب در نظر گرفته نمی‌شود. قطع جریان ورودی یک تالاب نه‌تنها بر رژیم هیدرولوژیکی آن تأثیر می‌گذارد، بلکه عملکرد بوم‌شناختی آن را نیز از بین می‌برد و به دنبال آن معضلاتی مانند طوفان‌های گردوغبار و به خطر افتادن سلامت جامعه را در پی دارد (Sarhadi and Soltani, 2013).

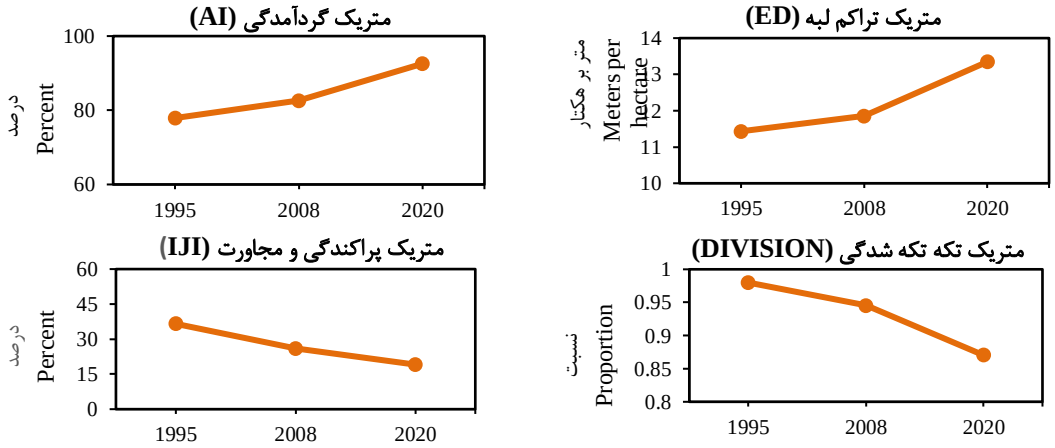


شکل ۷- وضعیت تالاب گاوخونی بر اساس NDWI در سال‌های ۱۳۷۴ و ۱۳۹۹

Fig. 7- The status of Gavkhoni Wetland based on NDWI in 1995 and 2020

زیرسیستم سیمای سرزمین

بررسی ساختار سیمای سرزمین شهر اصفهان طی سه دوره زمانی موردمطالعه نشان می‌دهد که متریک‌های ED و AI افزایش‌یافته‌اند. این افزایش نشان‌دهنده گردآمدگی بیشتر، خوشه‌ای و متراکم شدن انواع لکه‌ها و درنتیجه توزیع نامناسب آن‌ها در سطح سیمای سرزمین است. روند کاهشی IJI بیانگر پراکندگی ضعیف‌تر لکه‌ها و کاهش DIVISION نیز نشان‌دهنده این است که اکثر مساحت سیمای سرزمین را لکه‌های ساخته‌شده تشکیل داده‌اند و به‌تبع خرددانگی کمتری پیداکرده‌اند (شکل ۸).

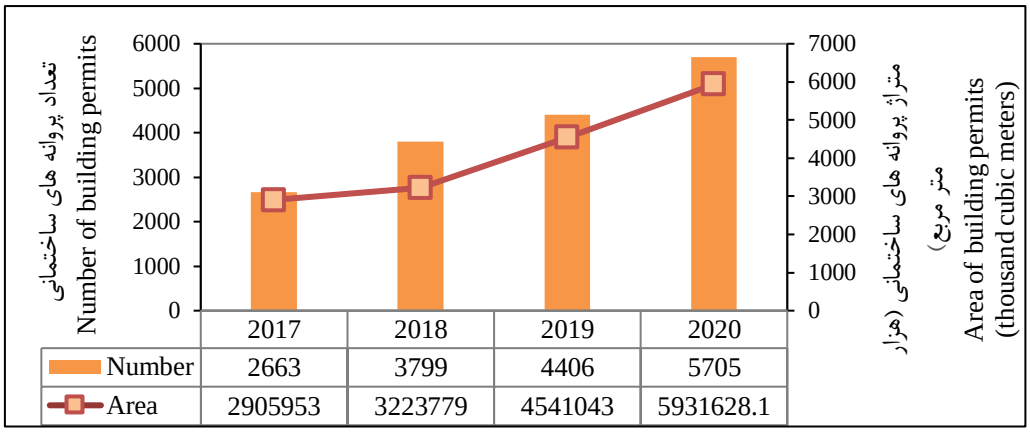


شکل ۸- متریک‌های سیمای سرزمین در شهر اصفهان طی سال‌های ۱۳۷۴ تا ۱۳۹۹

Fig. 8- Landscape metrics in Isfahan from 1995 to 2020

زیرسیستم ظرفیت برد شهری

در شهر اصفهان به‌ویژه طی سال‌های اخیر، روند توسعه شهری سرعت گرفته است (شکل ۹). به‌طوری‌که تعداد پروانه‌های ساختمانی از ۲۶۶۳ مورد در سال ۱۳۹۶ به ۵۷۰۵ مورد در سال ۱۳۹۹ رسیده است (Isfahan Municipality, 2020).

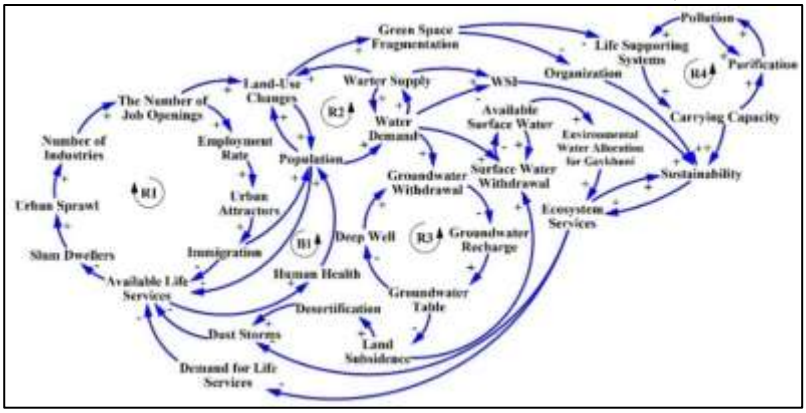


شکل ۹- وضعیت ساخت‌وساز در شهر اصفهان طی سال‌های ۱۳۹۶ تا ۱۳۹۹

Fig. 9- The construction making process in Isfahan (2017 to 2020)

نمودار علت - معلولی

در شکل ۱۰، با توجه به مسئله پژوهش، ارتباطات میان متغیرها با رسم حلقه‌های علت - معلولی نشان داده‌شده است.



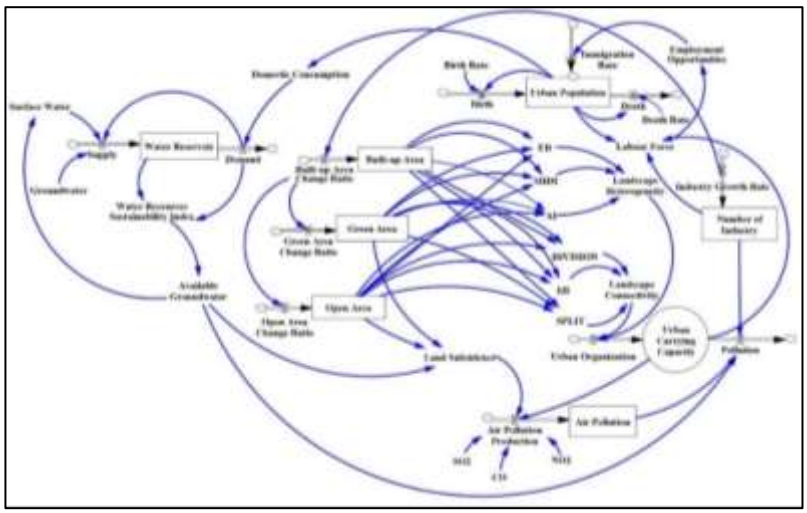
شکل ۱۰- نمودار علت - معلولی ظرفیت برد شهری

Fig. 10- The causal loop diagram of Isfahan carrying capacity

در پژوهش‌های مختلف آثار توسعه شهری بر ایجاد عدم تعادل در متغیرهای فیزیکی و بوم‌شناختی به‌ویژه در مناطق خشک، موردبررسی قرارگرفته است. در همه این پژوهش‌ها تأکید بر آسیب‌پذیری بوم‌سازگان‌ها نسبت به توسعه شهری، به‌ویژه در اقلیم‌های خشک شده است (Porras *et al.*, 2020; Wei *et al.*, 2021; Zuniga-Teran *et al.*, 2021). با بررسی که در این پژوهش روی زیرسیستم‌های مؤثر بر ظرفیت برد شهری انجام گرفت، روابط علت و معلولی این زیرسیستم‌ها، ترسیم شد. مطابق شکل ۱۰، رشد سریع در شهر اصفهان با افزایش تقاضای مسکن و قیمت ملک همراه است که باعث رشد حاشیه‌نشینی شده است. افرادی که در پی رفاه بیشتر به شهر مهاجرت کرده‌اند، با چالش‌هایی نظیر دسترسی به خدمات اولیه مواجه می‌شوند (حلقه R1). با گسترش شهر، تقاضا برای آب افزایش می‌یابد. هرچه تقاضا بیشتر شود، فشار روی منابع آب سطحی و زیرزمینی برای تأمین آب، بیشتر شده و در مقابل هرچه فشار برای تأمین آب بیشتر شود، با از بین رفتن حقابه‌های محیط زیستی و کشاورزی، جمعیت بیشتری به شهر جذب می‌شوند که موجب رشد فزاینده فعالیت‌های صنعتی خواهد شد. به دنبال خشک شدن تالاب، خدمات بوم-سازگان آن مانند تثبیت تپه‌های ماسه‌ای اطراف از بین رفته و طوفان‌های گرد و غبار را در پی دارد که سلامت مردم منطقه را به خطر انداخته است. همچنین برداشت ناپایدار آب‌های زیرزمینی نیز منجر به فرونشست زمین می‌شود که خود عاملی بر ایجاد طوفان‌های گردوغبار است. برداشت تهاجمی از آب‌های زیرزمینی به تغذیه کمتر آن و افت سطح آب زیرزمینی منجر می‌شود (حلقه R2 و R3). با خرددانگی لکه‌های سبز به‌عنوان سیستم پشتیبان حیات در شهرها، ظرفیت برد و توانایی پالایش در بوم‌سازگان شهر اصفهان کاهش‌یافته که می‌تواند آلودگی‌های محیط زیست را افزایش دهد و افزایش آلودگی خود کاهش ظرفیت پالایش را به دنبال دارد (حلقه R4). همچنین شاخص سازمان‌دهی بوم‌سازگان شهری نیز کاهش می‌یابد که اثر منفی بر پایداری شهر دارد. مطابق حلقه B1، در پی کاهش ظرفیت برد و پایداری شهر، خدمات بوم‌سازگان به‌عنوان سیستم پشتیبان رفاه و سلامت ساکنان، کاهش‌یافته و درنتیجه با کاهش جمعیت، حالت تعادلی در سیستم برقرار می-شود.

نمودار حالت–جریان

پس از تعریف زیرسیستم‌ها و روابط علت - معلولی میان متغیرها، مدل حالت - جریان بر پایه آن ایجاد شد و نتیجه در شکل ۱۱ نمایش داده‌شده است.

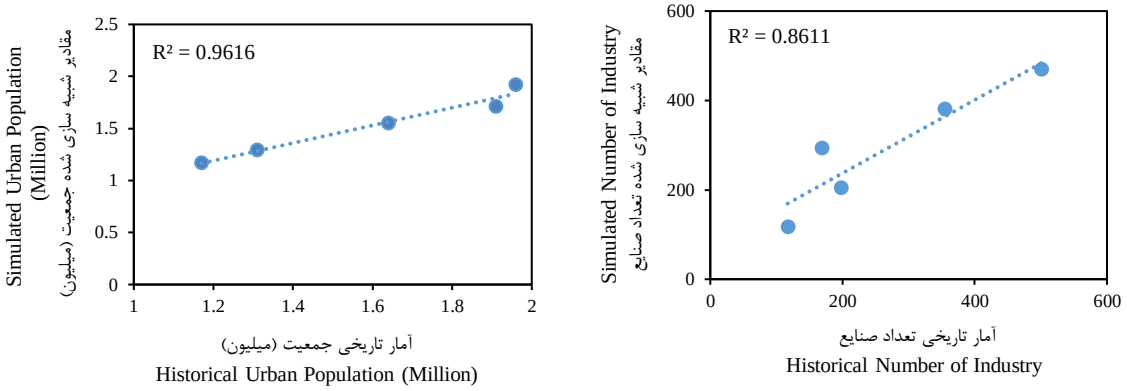


شکل ۱۱- نمودار حالت–جریان ظرفیت برد شهر اصفهان

Fig. 11- The stock and flow diagram of Isfahan's carrying capacity

اعتبارسنجی مدل

بر اساس اعتبارسنجی انجام‌شده از طریق مقایسه نتیجه شبیه‌سازی متغیرهای جمعیت شهری و تعداد صنایع با داده‌های مرجع که در شکل ۱۲ نشان داده شده است، مدل بسط داده شده در این پژوهش، عملکرد قابل قبولی دارد.



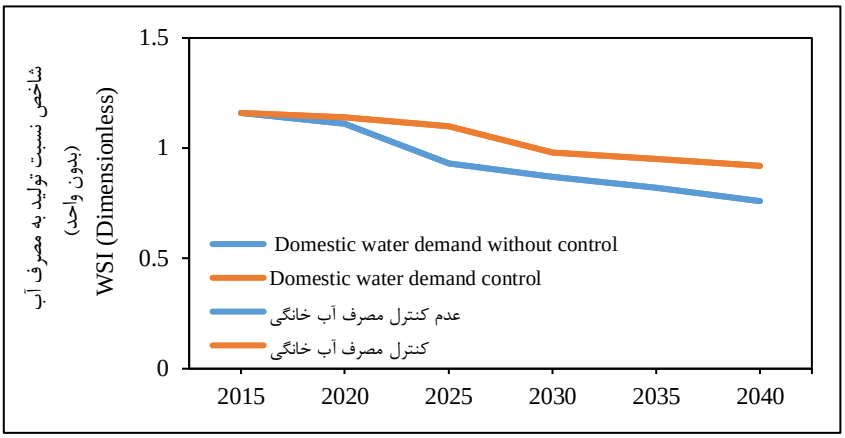
شکل ۱۲- نتایج اعتبارسنجی بر پایه ضریب تبیین

Fig. 12- Results of validation based on the correlation coefficient (R2) -

بر اساس مدل‌سازی پویایی سیستم و تحلیل ساختار سیمای سرزمین که در پژوهش حاضر انجام شد، نتایج نشان می‌دهد که طی دهه‌های اخیر، آسیب‌پذیری شهر اصفهان به‌عنوان بوم‌سازگانی که در اقلیم خشک واقع‌شده، افزایش‌یافته است. در اثر توسعه ساخت‌وسازها، متریک‌های پیوستگی مانند DIVISION و IJI به ترتیب کاهش ۱۱/۲ و ۴۷/۸ درصدی داشته‌اند که نشان‌دهنده افزایش خرددانگی سیمای سرزمین است. ازنظر فرایندهای بوم‌شناختی نیز تعداد روزهای پاک و سالم به ترتیب کاهش ۸۱/۸۲ و ۱۵/۵۶ درصدی را نشان می‌دهد. از سوی دیگر فشارها تنها محدود به بوم‌سازگان شهر اصفهان نیست، بلکه حوضه آبخیز زاینده‌رود نیز تحت تأثیر چنین توسعه شهری نامتوازنی قرارگرفته است. به‌طوری‌که تالاب گاوخونی به‌عنوان بوم‌سازگان بااهمیتی که در پایین‌دست حوضه آبخیز زاینده‌رود قرارگرفته است، در حال خشک شدن است که خود اثرات بوم‌شناختی زیادی به همراه خواهد داشت. همگی این عوامل فشار باعث کاهش ظرفیت برد شهر اصفهان طی سال‌های اخیر شده است. این در حالی است که با تقویت سیستم‌های پشتیبان حیات شهری در اصفهان و حوضه آبخیز مربوط به آن، این شرایط قابل اصلاح می‌باشد. یافته‌های پژوهش حاضر با پژوهش‌های محققانی مانند Madani and Mariño (2009)، Sarhadi and Soltani (2013) و Ravar *et al.* (2020) که روی متغیرهای کلیدی مانند آب در مناطق خشک، ظرفیت برد منابع آب سطحی و زیرزمینی و کنترل حد رشد شهری به این نتیجه رسیدند، هم‌راستا است. به‌خصوص در ارتباط با آسیب‌پذیری ظرفیت برد شهرهای واقع در مناطق خشک که در پژوهش Parivar *et al.* (2020) موردبررسی قرارگرفته است، در یافته‌های این پژوهش هم این اصل مورد تأیید قرارگرفته است. در این پژوهش، برای درک تأثیر سیاست‌های توسعه شهری بر عملکردهای بوم‌شناختی در این منطقه، دو سیاست مورد ارزیابی قرارگرفته است. در ادامه پیامد این دو سیاست بر ظرفیت برد شهر اصفهان، بر اساس مدل بسط داده‌شده فوق نشان داده‌شده است.

سناریوی کنترل تقاضای آب در بخش خانگی

مطابق شکل ۶، حدود ۹۰ درصد مصرف آب شهر اصفهان مربوط به بخش خانگی است. بنابراین کنترل و مدیریت مصرف در این بخش سهم بسزایی در پایداری منابع آب خواهد داشت. در شکل ۱۳ تأثیر کنترل و عدم کنترل الگوی مصرف آب خانگی روی روند شاخص WSI نشان داده‌شده است. درنتیجه یکی از مهم‌ترین اقدامات مدیریتی برای احیاء سیستم پشتیبان حیات و بهبود وضعیت ظرفیت برد شهر اصفهان، مدیریت جامع مصرف آب شهری است.

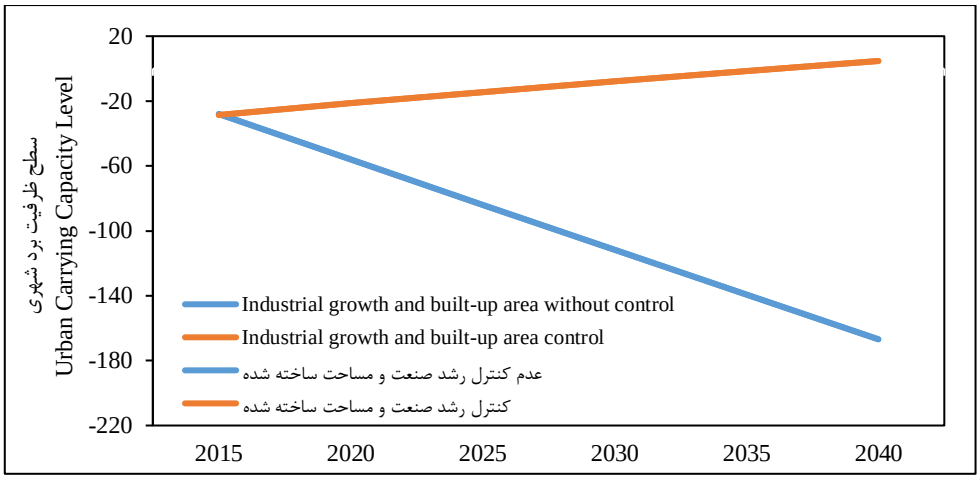


شکل ۱۳- سناریوی اول: پیش‌بینی نتیجه کنترل الگوی مصرف خانگی آب بر شاخص WSI تا سال ۲۰۴۰

Fig. 13- The first scenario: the effect of controlling the domestic water consumption on the WSI until 2040

سناریوی کنترل مساحت ساخته شده و تعداد صنایع

با توجه به روند شهرنشینی و رشد صنعتی این سناریو اثر کنترل و عدم کنترل مساحت ساخته شده و تعداد صنایع را بر ظرفیت برد شهر بررسی می‌کند (شکل ۱۴). همان‌گونه که در نمودار نشان داده شده است، با افزایش صنایع در این منطقه، تحت تأثیر افزایش مهاجرت به شهر اصفهان و تقاضا برای ساخت و ساز شهری بیشتر ظرفیت برد شهر اصفهان به شدت کاهش خواهد یافت.



شکل ۱۴- پیش‌بینی نتیجه کنترل مساحت ساخته شده و تعداد صنایع بر ظرفیت برد شهری تا سال ۲۰۴۰

Fig. 14 The second scenario: the effect of controlling the industrial growth and built-up area until 2040

نتیجه‌گیری

شهر یک سیستم پیچیده و دارای زیرسیستم‌های متنوعی است که در ابعاد مختلف مکانی و زمانی قابل‌تعریف است. بنابراین، درک پویایی رابطه بین ساختار و عملکرد شهری، منجر به تصمیم‌گیری بهتر برای حرکت به سمت پایداری می‌شود. بر اساس مدل‌سازی در این پژوهش مشخص شد ظرفیت برد بوم‌سازگان‌های خشک مانند شهر اصفهان تحت فشار متغیرهایی مانند افزایش سطوح نفوذناپذیر و رشد صنعت کاهش می‌یابد. نکته قابل‌توجه این است که رشد شهر باید مقیاس خود را با ظرفیت برد بوم‌شناختی هماهنگ کند. نسبت تولید به مصرف آب به‌عنوان شاخصی که می‌تواند بیانگر پایداری منابع آب به‌ویژه در مناطق خشک باشد و همچنین نسبت سطوح ساخته‌شده به فضای سبز شهری به‌عنوان تعیین‌کننده‌های کلیدی در پژوهش حاضر شناسایی شدند تا برای برآورد ظرفیت برد شهرها مورداستفاده قرار گیرند. سیاست‌های شهری می‌توانند با کنترل ساخت و ساز و توسعه فضاهای سبز و باز، همچنین مدیریت مصرف آب خصوصاً در بخش خانگی، توجه به تبعات رشد صنعت در

مناطق خشک و آسیب‌پذیر به‌طور مؤثری ظرفیت برد شهری را بهبود بخشیده و خدمات بوم‌سازگان را افزایش دهند. اتخاذ راهبردهای مناسب در موضوعاتی مانند ظرفیت برد شهری بدون نگاه جامع و کل‌نگر امکان‌پذیر نیست و باید به‌جای راه‌حل‌های موقت مانند طرح‌های انتقال آب، رفتار سیستم را در بلندمدت ارزیابی کرد.

سپاسگزاری

درانجام تحقیق حاضر، از هیچ سازمان یا نهادی کمک مالی دریافت نشده و این تحقیق بصورت مستقل توسط نویسندگان مقاله انجام شده است.

پی‌نوشت‌ها

[1] Splitting Index
[2] Number of Patches (NP)
[3] Mean Patch Area (AREA_MN)
[4] Shannon's Diversity Index (SHDI)
[5] Euclidean Nearest-Neighbor Distance (ENN)
[6] Edge Density (ED)
[7] Ecosystem Organization
[8] Vensim
[9] Reinforcing loops
[10] Balancing loops
[11] State or Level Variables

منابع

Habibi, K., Hoseini, S.M., Dehshti, M., Khanian, M. and Mosavi, A., 2020. The impact of natural elements on environmental comfort in the Iranian-Islamic historical city of Isfahan. International journal of environmental research and public health. 17, 5776.

Isfahan Department of Environment., 2021. Air quality in Isfahan. Available online at: http://isfahan-doe.ir/.

Isfahan Municipality., 2020. Isfahan City Statistical Report, . Available online at: https://plan.isfahan.ir/fa/statistics-contents.

Isfahan Provincial Government., 2013. Comparative comparison of the results of Population and Housing Censuses in 2006 and 2011. Available online at: http://lib.ui.ac.ir/dL/search/default.aspx?Term=123422&Field=0&DTC=1.

Javadi, F., Rezayan, S. and Jozi, S.A., 2020. Evaluating Satellite Indicators in Determining the Level of Aquatic Areas Using Satellite Sensors (Case Study: Zaribar Wetland, Kurdistan Province). Iranian journal of Ecohydrology. 7, 539-550.

Li, G., Kou, C., Wang, Y. and Yang, H., 2020.

Amiri, K., Seyed kaboli, H. and Mahmoodi-kohan, F., 2021. Study and monitoring of wetland area changes and its impact on wetland surface temperature using NDWI, MNDWI, and AWEI indices (case study: Hor-alazim and Shadegan wetlands). Irrigation Sciences and Engineering. 44, 59-74.

Chiesura, A., 2004. The role of urban parks for the sustainable city. Landscape and Urban Planning. 68, 129-138.

Coyle, R.G., 1997. System dynamics modelling: a practical approach. Journal of the Operational Research Society. 48, 544-544.

Dehghan Manshadi, Z., Parivar, P., Sotoudeh, A. and Morovati Sharifabadi, A., 2023. Exploring the spatio-temporal dynamics of life support system capacity of urban regions based on ecosystem health assessment (the case of Tehran, Iran). Environment, Development and Sustainability. doi:https://doi.org/10.1007/s10668-023-03148-6

Francis, A. and Thomas, A., 2022. A framework for dynamic life cycle sustainability assessment and policy analysis of built environment through a system dynamics approach. Sustainable cities and society. 76, 103521.

System dynamics modelling for improving urban resilience in Beijing, China. Resources, conservation and recycling. 161, 104954.

Madani, K., and Mariño, M.A., 2009. System dynamics analysis for managing Iran's Zayandeh-Rud river basin. Water Resources Management. 23, 2163-2187.

Madlener, R. and Sunak, Y., 2011. Impacts of urbanization on urban structures and energy demand: What can we learn for urban energy planning and urbanization management? Sustainable cities and society. 1, 45-53.

Mao, X., Huang, X., Song, Y., Zhu, Y. and Tan, Q., 2020. Response to urban land scarcity in growing megacities: Urban containment or inter-city connection? Cities. 96, 102399.

Niliyeh Brojeni, M. and Ahmadi Nadoushan, M., 2019. The relationship between urban vegetation and land surface temperature in Isfahan city using Landsat TM and OLI satellite images and LST index. Environmental Sciences. 17, 163-178.

Nooraie, H. and Shafi, F., 2020. Investigating the Relationship between Socio-Economic Poverty and Physical-Functional Deprivation in Isfahan. Geography and Environmental Planning. 31, 61-78.

Parivar, P., Quanrud, D., Sotoudeh, A. and Abolhasani, M., 2020. Evaluation of urban ecological sustainability in arid lands (case study: Yazd-Iran). Environment, Development and Sustainability, 1-30.

Porras, G. L., Stringer, L.C. and Quinn, C.H., 2020. Building dryland resilience: Three principles to support adaptive water governance. Ecological economics. 177, 106770.

Ravar, Z., Zahraie, B., Sharifinejad, A., Gozini, H. and Jafari, S., 2020. System dynamics modeling for assessment of water–food–energy resources security and nexus in Gavkhuni basin in Iran. Ecological Indicators. 108, 105682.

Ribeiro, P. J. G. and Gonçalves, L.A.P.J., 2019. Urban resilience: A conceptual framework. Sustainable cities and society. 50, 101625.

Sarhadi, A. and Soltani, S., 2013. Determination of water requirements of the Gavkhuni wetland, Iran: A hydrological approach. Journal of arid environments. 98, 27-40.

Seidl, I. and Tisdell, C.A., 1999. Carrying capacity reconsidered: from Malthus' population theory to cultural carrying capacity. Ecological economics. 31, 395-408.

Shamsaie, S., Ahmadi Nadoushan, M. and Jalalian, A., 2022. Spatiotemporal modeling of CO pollutant in city of Isfahan using MODIS imagery and ANFIS and RF algorithms. Environmental Sciences. 20, 1-16.

Statistical center., 2016. Available online at: https://www.amar.org.ir/.

Sterman, J.D., 2000. Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World. McGraw-Hill

Sterman, J.D., 2011. Communicating climate change risks in a skeptical world. Climatic Change. 108, 811-826.

United Nations, 2019. World Urbanization Prospects: The 2018 Revision. Available online at: https://population.un.org/wup/publications/Files/WUP2018-Report.pdf.

Wei, F., Wang, S., Brandt, M., Fu, B., Meadows, M.E., Wang, L., Wang, L., Tong, X. and Fensholt, R., 2021. Responses and feedbacks of African

dryland ecosystems to environmental changes. Current Opinion in Environmental Sustainability. 48, 29-35.

World Bank, 2021. Urban population (% of total population). Available online at: https://data.worldbank.org/indicator/SP.URB.TOTL.IN.ZS.

Wu, G., Li, L., Ahmad, S., Chen, X. and Pan, X., 2013. A dynamic model for vulnerability assessment of regional water resources in arid areas: a case study of Bayingolin, China. Water Resources Management. 27, 3085-3101.

Xu, J., Kang, J., Shao, L. and Zhao, T., 2015. System dynamic modelling of industrial growth and landscape ecology in China. Journal of environmental management. 161, 92-105.

Yang, Y., Song, G. and Lu, S., 2020. Assessment of land ecosystem health with Monte Carlo simulation: A case study in Qiqihaer, China. Journal of Cleaner Production. 250, 119522.

Yushanjiang, A., Zhang, F. and Leong Tan, M., 2021. Spatial-temporal characteristics of ecosystem health in Central Asia. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 105, 102635.

Zhang, F., Liu, X., Zhang, J., Wu, R., Ma, Q. and Chen, Y., 2017. Ecological vulnerability assessment based on multi-sources data and SD model in Yinma River Basin, China. Ecological Modelling. 349, 41-50.

Zhang, X. and Li, H., 2018. Urban resilience and urban sustainability: What we know and what do not know? Cities. 72, 141-148.

Zou, L., Wang, J. and Bai, M., 2022. Assessing spatial–temporal heterogeneity of China's landscape fragmentation in 1980–2020. Ecological Indicators. 136, 108654.

Zuniga-Teran, A.A., Mussetta, P.C., Ley, A.N.L., Díaz-Caravantes, R.E. and Gerlak, A.K., 2021. Analyzing water policy impacts on vulnerability: Cases across the rural-urban continuum in the arid Americas. Environmental Development. 38, 100552.

Environmental Sciences Vol.21 / No 3 / Autumn 2023

131-148
Original Article

Evaluating the effects of urban development on the ecological carrying capacity of Isfahan based on the system dynamics approach

Zahra Dehghan Manshadi and Parastoo Parivar*

Department of Environmental Sciences, Faculty of Natural Resources and Desert Studies, Yazd University, Yazd, Iran

Received: 2023.01.26 Accepted: 2023.04.26

Dehghan Manshadi, Z. and Parivar, P., 2023. Evaluating the effects of urban development on the ecological carrying capacity of Isfahan based on the system dynamics approach. Environmental Sciences. 21(3): 131-148.

Introduction: The management of social-ecological systems such as cities is extremely complicated due to the interdependence of subsystems, the cause-and-effect relationships that exist between them, and the impacts on sustainability. The necessity of ecological capacity and the ability of cities to sustain their potential to provide goods and services to both current and future generations cannot be overstated. Understanding how arid ecosystems adapt to disturbances is critical for the sustainable management of such areas, given the global extent of this type of ecosystem and its fragility, both structurally and functionally. The purpose of this study is to assess the impacts of urban growth on the carrying capacity of Isfahan, which is located on Iran's central plateau. In this regard, simulation models can be an effective tool in providing scientific decisions in dealing with complex and unknown social and ecological systems.

Material and methods: In this study, system dynamics modeling was used to determine the cause-and-effect relationships between variables affecting Isfahan's carrying capacity. In order to examine the landscape structure, DIVISION, SPLIT, and IJI metrics have been used to show connectivity, and ED, SHDI, and AI metrics have been used to determine the heterogeneity of the landscape of Isfahan City. After problem articulation, the model boundary was defined in the initial step of the modeling process by developing the subsystem diagram. After the population, environment, landscape, and carrying capacity subsystems were

* Corresponding Author: *Email Address*. parivar.p@yazd.ac.ir
http://dx.doi.org/10.48308/envs.2023.1269
http://dorl.net/dor/20.1001.1.17351324.1402.21.3.6.6
Copyright: © 2023 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

evaluated, a cause-and-effect diagram was made. The flow diagram and scenario were also made to evaluate the state of Isfahan's carrying capacity. In order to validate the model, the historical trend and simulation of two variables of urban population and the number of industries have been compared using the coefficient of determination.

Results and discussion: The pressure factors on the urban carrying capacity were detected and analyzed by assessing key variables in the system, such as water sustainability (WSI) and air quality, as well as changes in the landscape structure of Isfahan using landscape metrics. The research findings indicate that approximately 90% of the urban water demand is dedicated to the domestic sector; therefore, the first scenario is related to the management of water consumption in this sector and its influence on the Water Supply–Demand Index. This scenario showed that if domestic water demand is not controlled, the result of this index will reach nearly 0.7 by 2040, indicating greater vulnerability to the region's water resources. The second scenario is related to the city's increasing trend of construction and the number of industries, the impact of which has been shown on the carrying capacity.

Conclusion: The current study's findings, based on two enlarged scenarios, demonstrated that water demand, changes in the structure of the urban landscape, and the growth of industries all have a major impact on Isfahan's carrying capacity. Therefore, by controlling and managing water consumption in the domestic sector, limiting industrial growth, preventing the destruction of gardens, enhancing urban green and open areas, and limiting the increase of impervious urban surfaces, Isfahan's carrying capacity will improve.

Keywords: Urban carrying capacity, System thinking, Landscape structure and function, Arid ecosystems.