2019, Vol.6, No.2, Pages 69 to 76
Journal of Water and Sustainable Development

سال ششم، شماره ۲، ۱۳۹۸، صفحات ۶۹ تا ۷۶
نشریه آب و توسعه پایدار

Article Type: Applied

نوع مقاله: کاربردی

An Integrated Indicator Based on Basin Hydrology, Environment, Life, and Policy: The Watershed Sustainability Index

شاخصی یکپارچه بر مبنای مسائل هیدرولوژی، محیط‌زیست، معیشت و سیاست‌گذاری: شاخص پایداری حوضه

Translated by: M. Rahmani

Ph.D. Candidate in water engineering, irrigation and drainage, University: ferdowsi university of mashad, Iran.

E-Mail: ma.rahmani39@um.ac.ir

ترجمه: مهسا رحمانی

دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد.

E-Mail: ma.rahmani39@um.ac.ir

Received: 14-01-2018
Accepted: 24-10-2019

تاریخ دریافت: ۹۶/۱۰/۲۵
تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۸/۰۲

Abstract

Several issues impact the water sustainability of a river basin. Among them are the social, economic, and environmental aspects. However, they are often treated separately, and not as an integrated, dynamic process. In order to integrate the hydrologic, environmental, life and policy issues, as well as the existing pressures and policy responses in one quantitative, dynamic, and aggregated indicator, a watershed sustainability index (WSI), which uses a pressure–state–response function, was developed and is proposed in this paper. Applied to a 2,200 km2 Unesco–HELP demonstration basin in Brazil (SF Verdadeiro), the value obtained for WSI was 0.65, which represents an intermediate level of basin sustainability.

Keywords: Hydrology, Environment, Life, Policy, Watershed, Sustainability index, SF Verdadeiro, HELP basin.

چکیده

مسائلی چندگانه بر پایداری آب حوضه‌آبریز تأثیر می‌گذارند و در میان آنها، جنبه‌های اجتماعی، اقتصادی و محیط‌زیستی وجود دارند. با این حال، آنها اغلب به طور جداگانه و نه به عنوان یک فرآیند یکپارچه و پویا بررسی می‌شوند. به منظور ادغام مسائل هیدرولوژیکی، محیط‌زیستی، معیشت و سیاست‌گذاری و همچنین فشارهای موجود و پاسخ‌های سیاستی به صورت کمی، پویا و جامع، یک شاخص پایداری حوضه‌آبریز (WSI)[1]، بر اساس مدل فشار- وضعیت- واکنش، توسعه‌یافته و در این مقاله پیشنهاد شده است. با به کارگیری شاخص Unesco-HELP برای حوضهٔ ۲۲۰۰ کیلومتری در برزیل (SF Verdadeiro)، مقدار عددی به دست آمده برای شاخص WSI برابر ۰/۶۵ بوده که نشان‌دهندهٔ یک سطح متوسط از پایداری در حوضه می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: هیدرولوژی، محیط‌زیست، معیشت، سیاست‌گذاری، حوضه‌آبریز، شاخص پایداری، SF Verdadeiro، حوضه HELP.

ترجمه از:

Chaves, Henrique & Alipaz, Suzana. 2007. An Integrated Indicator Based on Basin Hydrology, Environment, Life, and Policy: The Watershed Sustainability Index. Water Resources Management, 21: 883-895. 10.1007/s11269-006-9107-2.

DOI: 10.22067/jwsd.v6i2.70209

مقدمه

مسائلی چندگانه بر پایداری آب حوضه‌آبریز تأثیر می‌گذارند و در میان آنها، جنبه‌های اجتماعی، اقتصادی و محیط‌زیستی وجود دارند. با این حال، آنها اغلب به طور جداگانه و نه به عنوان یک فرآیند یکپارچه و پویا بررسی می‌شوند (Viessmann، ۱۹۹۰). علاوه بر این، مدیریت یکپارچه منابع آب و محیط‌زیست پایدار، نیاز به ارزیابی بیشتر اثرات محیط‌زیستی دارد. این موضوع نیاز به یکپارچگی مسائل سیاستی، ارزیابی پروژه و قوانین مدیریت صحیح آب و مؤسسات، در سراسر فرآیند تصمیم‌گیری در مورد استفاده از منابع آب شیرین دارد (Smith و Rast، ۱۹۹۸). اگرچه شاخص‌هایی برای کمبود آب و محیط‌زیست وجود دارند، اما آنها مخصوص حوضه نیستند و هدف از آنها دستیابی به پایداری حوضه با توجه به مدیریت یکپارچه منابع آب و پوشش دادن متغیرهای مختلف نیست. اخیراً برنامه بین‌المللی هیدرولوژی یونسکو (IHP) چارچوبی که شامل مسائل هیدرولوژی، محیط‌زیست، معیشت و سیاست‌گذاری می‌باشد را تصویب کرده است (UNESCO، ۲۰۰۵). در سال ۲۰۰۶، بیش از ۶۰ حوضه عملیاتی و نمایشی HELP[۲] در سراسر جهان وجود داشت که طرحی را برای به اشتراک‌گذاری تجربه‌های مدیریت منابع آب فراهم می‌کرد.

یک شاخص یکپارچه پایداری حوضه‌آبریز، با پوشش مسائل و پاسخ‌های مختلف اجتماعی- اقتصادی و محیط زیستی، برای دسترسی به سطح پایداری حوضه‌های رودخانه‌ای مفید خواهد بود و نه تنها چارچوبی برای مقایسه، بلکه همچنین ابزاری برای شناسایی مشکلات جهت دستیابی به پایداری حوضه می‌باشد.

هدف از این مطالعه ارائه یک شاخص یکپارچه پایداری حوضه‌آبریز براساس مسائل و پاسخ‌های هیدرولوژیکی، محیط‌زیست، معیشت و سیاست‌گذاری آب بود. به منظور نشان دادن کارایی شاخص،WSI در حوضه SF Verdadeiro، در جنوب برزیل محاسبه شد. WSI می‌تواند به تمام حوضه‌ها اعمال شود، در صورتی که اطلاعات و داده‌های مورد نیاز، موجود باشند.

ادغام مسائل هیدرولوژی، محیط‌زیست، معیشت و سیاست‌گذاری در یک شاخص پایداری

ارزیابی‌های پایداری باید شرایط مرزهای سیاسی را در نظر بگیرند. اگرچه حوضه‌های آبریز واحد برنامه‌ریزی منابع آب هستند، اما عموماً با مرزهای سیاسی همخوانی ندارند (Nyerges، ۲۰۰۲). به همین دلیل، به ندرت حوضه‌های آبریز به عنوان واحد برنامه‌ریزی و مدیریت استفاده می‌شوند. علی‌رغم این‌که پایداری منابع آب در یک حوضه مستقیماً به شرایط هیدرولوژیکی، محیط زیستی، معیشت و سیاست‌گذاری آن مربوط می‌شود، اما تلاش‌های چندانی برای تلفیق آنها به صورت واحد و قابل مقایسه انجام نشده است.

شاخص‌های یکپارچه با هدف بررسی و برنامه‌ریزی استفاده می‌شوند. برنامه توسعه سازمان ملل متحد برای چندین سال از شاخص توسعه انسانی (HDI)[۳] استفاده کرده است (UNDP، ۱۹۹۸). این شاخص ترکیبی از آموزش و پرورش، امید به زندگی و اطلاعات درآمدی برای شهرداری‌ها، ایالت‌ها و کشورها است. مقادیر HDI بین (۰ تا ۱) متغیر بوده، استفاده از آن بسیار ساده و در سراسر جهان به منظور ارزیابی توسعه، به کار می‌رود.

Sullivan و همکاران (۲۰۰۳) با هدف ارزیابی کمبود آب و دسترسی به آب برای جمعیت فقیر بر اساس مقیاس مکانی، شاخص فقر آب را توسعه دادند. آژانس‌های تأمین مالی مانند بانک جهانی، این شاخص را به منظور شناخت کشورها و مناطقی که تنش شدید آب دارند، استفاده نموده‌اند (Sullivan و Meigh، ۲۰۰۳). Lawrence و همکاران (۲۰۰۳)، با محاسبه شاخص فقر آب در کشورهای مختلف جهان دریافتند که این شاخص تا حدی با شاخص HDI کشورها ارتباط دارد ($r = ۰/۸۱$).

تغییر شرایط در شاخص فقر آب، شاخص تغییرات اقلیم (CVI) (Sullivan) و Meigh، ۲۰۰۵) است. این شاخص شامل اطلاعات اجتماعی، بیوفیزیکی و اقتصادی بوده و ارزیابی جامعی از آسیب‌پذیری انسان به تغییرات در منابع آب، در مقیاس‌های مختلف را ارائه می‌دهد. شاخص CVI یک ابزار مفید برای ارزیابی آسیب‌پذیری انسان به اثرات تغییر اقلیم، به ویژه جمعیت فقیر را فراهم می‌کند (Sullivan، ۲۰۰۶).

اخیراً، یک شاخص پایداری محیط زیست (ESI) پیشنهاد شده است (Esty و Levy، ۲۰۰۵). این شاخص از پنج جزء شامل ۲۱ زیرشاخص و ۷۶ متغیر استفاده می‌کند. اگر چه در چندین کشور استفاده شده است، اما تعداد زیادی از نشانگرها و متغیرهای آن مانع از کاربرد این شاخص در مناطقی که کمبود داده وجود دارد، می‌شوند.

شاخص‌های بالا علاوه بر این که مختص حوضه نیستند، به روابط علت-معلول هم توجه ننموده و به عنوان بخشی از پایداری حوضه با پاسخ‌های سیاستی که در یک حوضهٔ مشخص در یک دورهٔ معین اجرا می شوند، مرتبط نیستند.

شاخص‌های پایداری و پارامترها باید برخی از معیارهای اساسی را برای رسیدن به اهداف خود داشته باشند. با توجه به معیارهای حفاظت از زیست‌کره (HTCF، ۲۰۰۳)، شاخص‌های حوضه‌آبریز باید دارای ویژگی‌های زیر باشند:

۱- در دسترس: اطلاعات شاخص باید موجود و به راحتی قابل دسترس باشند. آنها باید در سراسر حوضه‌آبریز جمع‌آوری، به طور منظم منتشر و در دسترس عموم قرار گیرند.
۲- قابل درک: شاخص‌ها باید به وضوح برای عموم قابل فهم باشند.
۳- معتبر و موثق: شاخص‌ها باید توسط اطلاعات قابل اعتماد و قابل اطمینان پشتیبانی شده و به روش علمی قابل تفسیر باشند.
۴- مرتبط: شاخص‌ها باید تغییرات در مدیریت و فعالیت‌ها در حوضه‌آبریز را منعکس کنند. آنها باید قادر به اندازه‌گیری تغییرات در طول زمان باشند.
۵- یکپارچه: شاخص‌ها باید ارتباط بین ابعاد پایداری شامل محیط زیستی، اجتماعی و اقتصادی را نشان دهند.

شاخصی که مطابق با معیارهای بالا از نظر کاربرد برای حوضه‌های آبریز، مطرح می‌شود، می‌تواند مورد استفاده جهانی قرار گیرد و به طور قابل توجهی در ایجاد پایداری منابع آب در حوضه‌های آبریز رودخانه، مفید واقع شود. با توجه به این که مدیریت حوضه، فرآیندی پویا و جامع است و فرض بر این است که پایداری آب در حوضه‌آبریز تابعی از مباحث هیدرولوژی (H)، محیط‌زیست (E)، معیشت (L) و سیاست‌گذاری منابع آب (P) و بر اساس یک مدل پویای فشار- وضعیت- واکنش (OECD، ۲۰۰۳) می‌باشد، برای این چهار زیرشاخص (H، E، L، P) در یک طرح، ماتریس تعریف می‌شود. در نتیجه، شاخص پایداری حوضه (WSI) به دست می‌آید. به صورت عددی، WSI طبق رابطه (۱) محاسبه می‌شود:

$$WSI = \frac{H + E + L + P}{4} \qquad (۱)$$

WSI: شاخص پایداری حوضه، H: زیرشاخص هیدرولوژیکی حوضه، E: زیرشاخص محیط‌زیستی حوضه، L: زیرشاخص معیشت حوضه و P: زیرشاخص سیاست‌گذاری بوده که دامنهٔ همه آنها بین صفر تا یک تغییر می‌کند. به این صورت که در بهترین وضعیت امتیاز یک و در بدترین وضعیت عدد صفر برای آنها در نظر گرفته می‌شود. همان‌طور که از معادله (۱) مشاهده می‌شود، همه شاخص‌ها وزن یکسان دارند. اگرچه وزن شاخص‌ها ممکن است از حوضه‌ای به حوضه دیگر متفاوت باشد و باید با هماهنگی بین گروداران انتخاب شود، به کار بردن وزن‌های یکسان سبب کم‌شدن اریبی در نتایج می‌شود (Heathcote، ۱۹۹۸) و اجازهٔ رابطه متقابل در میان بخش‌های مختلف و ذینفعان، هیدرولوژیست‌ها، جامعه‌شناسان، محیط‌زیست، کاربران آب و سیاست‌گذاران را می‌دهد. علاوه بر این، ساختار خطی و میانگین از معادله (۱) ساده و شفاف است، که امکان جبران اشتباه در شاخص‌ها و پارامترها را فراهم می‌آورد. این یک مسئله مهم در توسعه مدل است، اما اغلب مدل‌سازان آن را نادیده می‌گیرند (Chaves و Nearing، ۱۹۹۱).

مقدار کلی شاخص WSI بین صفر تا یک بدست می‌آید و در سه طبقه به شرح زیر تقسیم می‌شود:
الف- پایداری پایین (WSI < ۰/۶)
ب- پایداری متوسط (۰/۸ ≥ WSI ≥ ۰/۶)
پ- پایداری بالا (۰/۸ < WSI)

همانطور که در جدول (۱) ملاحظه می‌شود، برای تعیین امتیاز هر کدام از زیرشاخص‌ها، پارامترهایی در قالب فشار، وضعیت و واکنش در نظر گرفته شده‌اند:

جدول ۱- زیرشاخص‌ها و پارامترهای شاخص پایداری حوضه‌آبریز

زیرشاخص‌ها	پارامترهای فشار	پارامترهای وضعیت	پارامترهای واکنش
هیدرولوژی	تغییر در سرانه آب در دسترس در حوضه طی مدت مطالعاتی	سرانه آب قابل دسترس در حوضه (میانگین بلند مدت)	بهبود بهره‌وری استفاده از آب طی مدت مطالعاتی
	تغییر در BOD5 حوضه طی مدت مطالعاتی	BOD5 حوضه (میانگین بلند مدت)	بهبود در سیستم تصفیه/ دفع فاضلاب طی مدت مطالعاتی
محیط زیست	EPI حوضه (روستایی و شهری) طی مدت مطالعاتی	درصد مناطق با پوشش گیاهی طبیعی در حوضه	تکامل در حفاظت از حوضه (درصد مناطق حفاظت شده، BMPs طی مدت مطالعاتی)
معیشت	تغییر در سرانه درآمد در حوضه طی مدت مطالعاتی	HDI حوضه (وزنی شده با جمعیت شهرستان)	تکامل در HDI حوضه طی مدت مطالعاتی
سیاست‌گذاری	تغییر در زیرشاخص HDI-آموزش در حوضه طی مدت مطالعاتی	ظرفیت نهادی حوضه در جهت تحقق IWRM	تکامل در هزینه‌های IWRM حوضه طی مدت مطالعاتی

از آنجایی که مدیریت حوضه در سطح محلی و منطقه‌ای در حوضه‌های آبریز تا مساحت ۲۵۰۰ کیلومتر مربع (Schueler، ۱۹۹۵) موثرتر است، این حد بالای پیشنهاد شده برای استفاده از WSI در برآورد پایداری حوضه است. با این حال، اگر حوضه‌های بزرگ‌تر به امتیاز بالا برسند با WSI می‌توان آنها را در زیرحوضه‌ها تقسیم کرد و نمرهٔ کلی را با نمرهٔ WSI

زیرحوضه‌ها، محاسبه نمود. در جدول (۱) پارامترها به سه سطح، شامل فشار، وضعیت و واکنش (PSR) تقسیم شدند. مزیت استفاده از مدل PSR این است که روابط علت-معلول را در بر می‌گیرد و به گرودارن و تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کند تا ارتباطات بین پارامترها را ببینند (OECD، ۲۰۰۳).

۱- پارامترهای هیدرولوژی:

در زیرشاخص هیدرولوژی، دو مجموعه از پارامترها شامل، کمیت آب و کیفیت آب وجود دارد. در مورد کمیت آب، پارامتر مورد نظر، سرانه دسترسی به آب در هر سال با توجه به منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی است. بر اساس مطالعات فالکن مارک و ویداسترند (۱۹۹۲) تنش آبی هنگامی رخ می‌دهد که مقدار سرانه آب در دسترس به کمتر از ۱۷۰۰ متر مکعب در سال برسد. بنابراین، پنج سطح از سرانه دسترسی به آب انتخاب شده، مضرب‌هایی از حداقل استاندارد به صورت زیر هستند:

الف) Wa<۱۷۰۰، ب) ۱۷۰۰>Wa>۳۴۰۰، پ) ۳۴۰۰>Wa>۵۱۰۰، ج) ۵۱۰۰>Wa>۶۸۰۰ و د) ۶۸۰۰<Wa (مترمکعب در جمعیت در سال) که به ترتیب مربوط به سطوح بسیار ضعیف، ضعیف، متوسط، خوب و عالی برای دسترسی به آب است.

در مورد کیفیت آب، از آنجا که اطلاعات نیاز به اکسیژن بیوشیمیایی (BOD5 بر حسب میلی‌گرم در لیتر) اغلب در حوضه‌های آبریز موجود است و از آنجا که با سایر پارامترهای مهم کیفیت آب (اکسیژن محلول، کدورت وغلظت آلاینده‌ها) ارتباط دارد، به عنوان پارامتر کیفیت آب انتخاب شده است. اگر سایر پارامترهای کیفیت آب حوضه (مثلاً نیتروژن) از BOD5 بحرانی‌تر باشند، می‌توانند به عنوان شاخص کیفیت آب استفاده شوند. از آنجایی که اطلاعات دسترسی به آب و کیفیت آب در دوره‌ای که با میانگین بلندمدت سنجیده شده، مقایسه می‌شود، پارامترهای فشار هیدرولوژیکی دارای مزایای استفاده از تغییرپذیری/ تغییرات احتمالی اقلیمی می‌باشند که در شرایط خاصی می‌توانند به طور قابل توجهی روی دسترسی به آب در حوضه‌های آبریز، تأثیر بگذارند.

شرح کامل سطوح و امتیازات تمام پارامترهای WSI در جدول (۲) ارائه شده است.

اگر چه سطوح و امتیازات جدول (۲) اختیاری هستند و می‌توانند از حوضه‌ای تا حوضه دیگر متفاوت باشند، براساس محدوده‌های ممکن و آستانه‌های پارامترهای انتخاب شده، طیف وسیعی از شرایط حوضه‌آبریز پیشنهاد شده است. علاوه بر این، آنها هر دو جنبه‌های انسانی و محیط‌زیستی، و نیز خطرات پایدار بودن حوضه را در نظر می‌گیرند (برنامهٔ ارزیابی آب جهانی- WWAP، ۲۰۰۶).

۲- پارامترهای محیط‌زیستی

همانند پارامترهای هیدرولوژی، پارامترهای زیرشاخص محیط‌زیستی به سطوح فشار، وضعیت و واکنش تقسیم می‌شوند. در جدول (۲)، پارامتر فشار برای شاخص محیط‌زیستی، شاخص فشار بر محیط‌زیست (EPI)، یک نسخه اصلاح شده از شاخص فشار آنتروپی (API) است (Sawyer، ۱۹۹۷) و با میانگین تغییرات در مساحت زمین‌های کشاورزی حوضه و تغییر در جمعیت شهری (درصدی) در دوره مورد مطالعه تخمین زده می‌شود:

EPI = (درصد تغییر در مساحت زمین‌های کشاورزی حوضه + درصد تغییرات جمعیت شهری در حوضه) / ۲ (۲)

EPI می‌تواند مثبت، منفی یا صفر باشد. مقادیر مثبت، فشار بیشتر روی بقیهٔ گیاهان طبیعی حوضه (وضعیت محیط زیست) را نشان می‌دهد. این پارامتر حالت، به نوبه خود، تناسب زیادی با تنوع زیستی گیاهان و جانوران دارد که نشان‌دهندهٔ یکپارچگی کلی محیط‌زیست حوضه است (Emerton و Bos، ۲۰۰۴).

به نظر می‌رسد نسبت مساحت زمین‌های کشاورزی و جمعیت شهری با کیفیت آب حوضه (Hunsaker و Levine، ۱۹۹۵) ارتباط دارد. علاوه بر این، استفاده از اطلاعات دوره‌های پیشین، سرشماری کشاورزی و سرشماری جمعیت، کار آسانی است و به ویژه در کشورهای در حال توسعه از دیگر پارامترهای محیط‌زیستی، از قبیل شاخص‌های حیاتی آب، یکپارچگی محیط زندگی و غیره، به عنوان پارامتر استفاده می‌شود.

۳- پارامترهای معیشت

پارامترهای زیرشاخص معیشت مربوط به کیفیت زندگی بشر است. بنابراین، پارامتر انتخاب شده برای وضعیت معیشت، شاخص توسعه انسانی حوضه (HDI) در سال قبل از دوره مورد مطالعه می‌باشد. پارامتر واکنش زیرشاخص معیشت، درصد تغییر HDI حوضه در دورهٔ مورد مطالعه نسبت به مقدار قبلی است که نشان‌دهندهٔ تکامل (مثبت یا منفی) کیفیت زندگی در حوضه می‌باشد.

پارامتر فشار معیشت، به عنوان تغییر در درآمد HDI[۴] در نظر گرفته شده است؛ در واقع زیرشاخصی از HDI است که در دوره مورد مطالعه، درآمد جمعیت حوضه را به خود اختصاص می‌دهد. مقادیر منفی این پارامتر نشان می‌دهد که جمعیت در این دوره فقیرتر شده‌اند و برعکس. تغییر در متوسط درآمد جمعیت می‌تواند بر پایداری حوضه تأثیر بگذارد، و اثر آن قویاً بر شاخص‌های اجتماعی مانند بهداشت و آموزش و پرورش شناخته شده است (بانک جهانی، ۲۰۰۳؛ برنامه ارزیابی جهانی آب- WWAP، ۲۰۰۶).

مزیت استفاده از HDI و زیرشاخص‌های آن به عنوان پارامترهای معیشت، این است که آنها اغلب بر اساس مقیاس شهری در دسترس هستند. آنها می‌توانند به نوبه خود، برای حوضه به طور متوسط، با استفاده از جمعیت به عنوان عامل وزن، میانگین‌گیری شوند.

جدول ۲- شرح پارامترهای فشار WSI، سطوح و امتیازات

	پارامترهای فشار		پارامترهای وضعیت		پارامترهای واکنش		
شاخص‌ها	پارامترهای فشار	سطوح	پارامترهای وضعیت	سطوح	پارامترهای واکنش	سطوح	امتیازها
هیدرولوژی	Δ1 تغییر در سرانه آب در دسترس حوضه در دوره مورد مطالعه نسبت به میانگین دراز مدت (m3/person سال)	Δ1<−20% -20%<Δ1<-10% -10%<Δ1<0% 0<Δ1<+10% Δ1>+10%	سرانه آب در دسترس حوضه (مترمکعب بر جمعیت در سال)، با توجه به منابع آب سطحی و آب زیرزمینی	Wa<1,700 1,700<Wa<3,400 3,400<Wa<5,100 5,100<Wa<6,800 Wa>6,800	بهبود کارایی مصرف آب در حوضه در دوره مورد مطالعه	خیلی ضعیف ضعیف متوسط خوب عالی	۰ ۰/۲۵ ۰/۵ ۰/۷۵ ۱
	Δ2 تغییر در BOD5 حوضه در دوره مورد مطالعه نسبت به میانگین بلندمدت	Δ2>20% 20%>Δ2>10% 0<Δ2<10% -10%<Δ2<0% Δ2<-10%	BOD5 متوسط درازمدت حوضه (mg/ l)	BOD>10 10<BOD<5 5<BOD<3 3<BOD<1 BOD<1	بهبود سیستم تصفیه/ دفع مناسب فاضلاب در حوضه در دوره مورد مطالعه	خیلی ضعیف ضعیف متوسط خوب عالی	۰ ۰/۲۵ ۰/۵ ۰/۷۵ ۱
محیط زیست	E.P.I حوضه (روستایی و شهری) در دوره مورد مطالعه	EPI>20% 20%<EPI>10% 10%<EPI<5% 5%<EPI<0% EPI<0%	درصد مساحت پوشش طبیعی حوضه (Av)	Av<5 5<Av<10 10<Av<25 25<Av<40 Av>40	تکامل در وسعت مناطق حفاظت شده (مناطق حفاظت شده و BMPs) در حوضه، در دوره مورد مطالعه	Δ<-10% -10%<Δ<0% 0<Δ<+10% +10%>Δ>+20% Δ>20%	۰ ۰/۲۵ ۰/۵ ۰/۷۵ ۱
معیشت	تغییر در سرانه HDI-درآمد در حوضه در دوره مورد مطالعه نسبت به دوره قبلی	Δ<-20% -20%<Δ<-10% -10%<Δ<0 0<Δ<+10% Δ>+10%	HDI حوضه (وزنی شده با جمعیت شهرستان)	HDI<0.5 0.5<HDI<0,6 0.6<HDI<75/0 75/0<HDI<0.9 HDI>0.9	تکامل HDI حوضه در دوره مورد مطالعه	Δ<-10% -10%<Δ<0% 0<Δ<+10% +10%>Δ>+20% Δ>20%	۰ ۰/۲۵ ۰/۵ ۰/۷۵ ۱
سیاست‌گذاری	تغییر در HDI-آموزش حوضه در دوره مورد مطالعه نسبت به دوره قبلی	Δ<−20% -20%<Δ<-10% -10%<Δ<0% 0<Δ<+10% Δ>+10%	ظرفیت نهادی حوضه جهت تحقق IWRM (قانونی و سازمانی)	خیلی ضعیف ضعیف متوسط خوب عالی	تکامل در هزینه‌های IWRM در حوضه، در دوره مورد مطالعه	Δ<-10% -10%<Δ<0% 0<Δ<+10% +10%>Δ>+20% Δ>20%	۰ ۰/۲۵ ۰/۵ ۰/۷۵ ۱

۴- پارامترهای سیاست‌گذاری

پارامتر فشار سیاست‌گذاری، به عنوان تغییر زیرشاخص آموزش در شاخص توسعه انسانی[5] حوضه، مورد مطالعه قرار می‌گیرد. از آن‌جایی که این شاخص سطح تحصیلات جمعیت را اندازه‌گیری می‌کند، مقادیر مثبت آن با توانایی و تمایل جمعیت برای درگیرشدن در مدیریت حوضه‌آبریز مرتبط است و فشار بیشتری بر تصمیم‌گیرندگان وارد می‌کند. این همبستگی در چندین حوضه در برزیل مشاهده شد که در آن، مشارکت اجتماعی بالاتری در مدیریت منابع آب در حوضه‌های با سطح تحصیلات بالاتر روی داد (بانک جهانی، ۲۰۰۳). علاوه بر این، یک پارامتر ساده و در دسترس است که سبب تسهیل استفاده از آن می‌شود.

پارامتر وضعیت سیاست‌گذاری، ظرفیت نهادی سازمانی حوضه در مدیریت یکپارچه منابع آب است که از طریق سطح چارچوب قانونی و سازمانی کافی و همچنین سطح مدیریت مشارکتی در دوره مورد مطالعه، محاسبه می‌شود. این پارامتر یکی از چندین معیار کیفی WSI است که از بسیارضعیف با مقدار صفر تا عالی با مقدار یک، متغیر است. اگر قوانین کافی برای آب در حوضه وجود داشته باشد، اما اجرا نشده باشند، سطح میانی (۰/۵) می‌تواند برای پارامتر استفاده شود. به همین ترتیب، اگر هیچ قانون یا نهادی وجود نداشته باشد، نمره بسیار ضعیف معادل صفر برای این پارامتر اختصاص داده می‌شود و برعکس.

پارامتر واکنش سیاست‌گذاری با تکامل در هزینه‌های مدیریت یکپارچه منابع آب حوضه در دورهٔ مورد مطالعه برآورد می‌گردد و نشان‌دهندهٔ واکنش گرودارن و تصمیم‌گیرندگان در حل مشکلات منابع آب است. هزینه‌های بیشتر در مدیریت یکپارچه منابع آب، نشان‌دهندهٔ این است که حوضه، شانس بیشتری برای برآورده نمودن اهداف اصلی و فرعی مربوط به خود را داشته است و برعکس. این مقدار می‌تواند مثبت یا منفی باشد، که امتیازهای متفاوت از صفر تا یک خواهد گرفت.

۵- محاسبه شاخص WSI

پس از محاسبه پارامترهای هر چهار زیرشاخص و انتخاب یک دوره خاص برای تجزیه و تحلیل (مثلاً یک دوره ۵ ساله، همزمان با موجودی HDI و دیگر داده‌های سرشماری)، WSI بر اساس معادله (۱) محاسبه می‌شود. برای تسهیل محاسبات، می‌توان از صفحه گسترده استفاده کرد.

اعمال WSI به حوضه رودخانه SF Verdadeiro

برای نشان دادن کاربردی‌بودن مفهوم WSI، این شاخص برای حوضهٔ رودخانه SF Verdadeiro، که یک حوضهٔ‌آبریز با مساحت ۲۲۰۰ کیلومترمربع در جنوب برزیل است، اعمال گردید. دورهٔ مورد مطالعه یک دورهٔ ۵ ساله بین سال‌های ۱۹۹۶ تا ۲۰۰۰ بود که داده‌های محیط‌زیستی و اجتماعی آن موجود بود. از آنجا که WSI از چهار زیر شاخص تشکیل شده است، هر یک از آنها به صورت جداگانه ارائه شده و در پایان، شاخص پایداری کلی محاسبه گردیده است.

۱- زیرشاخص هیدرولوژی:

امتیاز زیرشاخص هیدرولوژی میانگین پارامترهای کمیت و کیفیت حوضه بود. در مورد زیر شاخص کمیت آب، از آنجا که منبع اصلی آب در حوضه، آب سطحی است، سرانهٔ آب در دسترس در سرتاسر کشور نرخ جریان متوسط درازمدت رودخانه تقسیم بر جمعیت حوضه بود.

رودخانه SF Verdadeiro در دهانهٔ خود دارای یک جریان متوسط طولانی‌مدت به میزان ۳۹ مترمکعب بر ثانیه است که تقسیم بر جمعیت کل حوضه (۱۶۷۰۸۳ ساکن بر مبنای سال ۲۰۰۰)، سرانه آب در دسترس (Wa)،۳۳۶۰۰ مترمکعب در سال بدست می‌آید.

بر اساس جدول (۴)، امتیاز پارامتر کمیت، یک می‌باشد (عالی). در مورد پارامتر کمیت فشار آب، تغییر در Wa در دورهٔ ۵ سالهٔ مورد مطالعه، با توجه به میانگین بلندمدت،۴/۸٪+ بود. این مقدار، طبق جدول (۲)، امتیاز فشار ۰/۷۵ را به دست می‌دهد. در مورد کیفیت واکنش، در دورهٔ ۵ ساله، برخی از بهبودها در کارآیی مصرف آب در حوضه که مربوط به امتیاز ۰/۵ است، موجود بود. بنابراین، میانگین پارامتر فشار، وضعیت و واکنش برای کمیت آب در حوضه ۰/۷۵=۰/۷۵+۰/۵)/۳+۱) محاسبه شد.

در مورد زیرشاخص کیفیت آب، پارامتر فشار مطابق با تغییر در BOD5 حوضه در دورهٔ ۵ ساله (۴/۶٪+) است، که طبق جدول (۳)، امتیاز آن ۰/۵ می‌باشد. پارامتر وضعیت برای کیفیت (میانگین بلندمدت BOD5 حوضه) برابر با ۱/۳ میلی گرم بر لیتر بود (شکل ۱). این نتایجی از امتیاز پارامتر وضعیت برابر با مقدار یک است.

پارامتر واکنش برای زیر شاخص کیفیت آب امتیاز ۰/۲۵ را داشت (بهبود ضعیف در تصفیه / دفع فاضلاب در ۵ سال مورد مطالعه).

بنابراین زیرشاخص کیفیت ۰/۵۸ = ۳/(۰/۲۵+۱+۰/۵) بود.

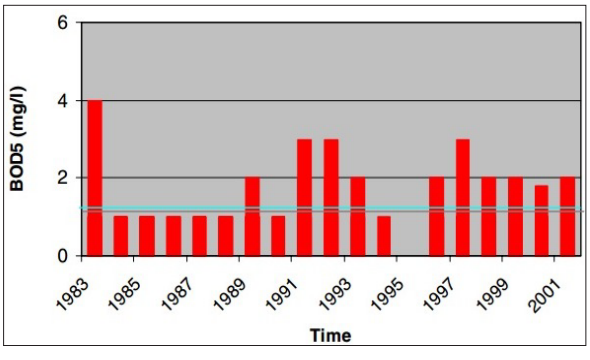
از این رو، شاخص کلی هیدرولوژی به سادگی میانگین زیرشاخص‌های کمیت و کیفیت و برابر با ۰/۶۷ = ۲/(۰/۵۸+۰/۷۵) محاسبه شد.

۲- زیرشاخص محیط‌زیست:

به طور مشابه برای زیرشاخص هیدرولوژی، زیرشاخص محیط‌زیست به عنوان میانگین پارامترهای فشار، وضعیت و واکنش آن محاسبه شد. در مورد پارامتر فشار، تغییر در حوضه‌های ترکیبی (افزایش) در زمین‌های کشاورزی و جمعیت شهری در دوره مورد مطالعه به ترتیب ۱۳ و ۹ درصد بود که مقدار EPI برابر ۱۱٪= ۲/(۹٪+۱۳٪) محاسبه شد. این مقدار معادل با امتیاز پارامتر فشار محیط‌زیستی ۰/۲۵ بود.

در مورد پارامتر وضعیت محیط‌زیست، حوضه در سال ۲۰۰۰، ۲۶ درصد از پوشش اصلی گیاهی خود را داشت که طبق جدول (۳) این مقدار، معادل امتیاز ۰/۷۵ بود. باقی‌ماندهٔ پوشش‌گیاهی طبیعی در یک حوضه، می‌تواند با استفاده از تکنیک‌های سنجش از دور از قبیل NDVI (Mather، ۱۹۹۹) به طور غیرمستقیم، از طریق سرشماری کشاورزی تخمین زده شود.

پارامتر واکنش محیط‌زیست (تکامل در مناطق حفاظت شده و مناطق با BMPs) در حوضه ۲٪ بود، که طبق جدول (۴) دارای امتیاز ۰/۷۵ بود. بنابراین، امتیاز کل شاخص محیط‌زیست ۰/۵۸= ۳ /(۰/۷۵+۰/۷۵+۰/۲۵) محاسبه گردید.



شکل ۱- BOD5 سالانه در رودخانه SF Verdadeiro با میانگین دراز مدت ۱/۳ (میلی‌گرم در لیتر)

۳- زیرشاخص معیشت:

پارامتر فشار معیشت در حوضه به وسیلهٔ تغییرات در زیرشاخص HDI درآمد حوضه در دوره ۵ ساله (۱۹۹۶-۲۰۰۰) برآورد شد. در آن دوره، HDI درآمد از ۳/۴٪ (UNDP، ۲۰۰۴) افزایش یافت، که طبق جدول (۳)، دارای امتیاز ۰/۷۵ (خوب) بود.

در مورد پارامتر وضعیت معیشت، HDI حوضه در سال قبل از دورهٔ مورد مطالعه ۰/۸۱ بود، و در نتیجه دارای امتیاز ۰/۷۵، بر اساس جدول (۴) بود. شکل (۲) توزیع HDI در حوضه SF Verdadeiro را در سال ۱۹۹۶ نشان می‌دهد. HDI کل حوضه، میانگین مقادیر HDI هر شهر و جمعیت مربوط به آن است.

پارامتر واکنش معیشت، یعنی تکامل هزینه‌های مدیریت منابع آب در حوضه، در دوره پنج‌ساله ۵٪+ بود که در نتیجه دارای امتیاز ۰/۷۵ (جدول ۵) بود. بنابراین، امتیاز کل زیرشاخص معیشت برای حوضه ۰/۷۵= ۳/(۰/۷۵+۰/۷۵+۰/۷۵) محاسبه گردید.

۴- زیرشاخص سیاست‌گذاری:

امتیاز پارامتر فشار سیاست‌گذاری (تنوع در زیرشاخص HDI – آموزش در دوره ۵ ساله) برای حوضه، ۶/۳٪+ بود که در نتیجه، امتیاز پارامتر ۰/۷۵ (جدول ۳) بود. این زیر شاخص نشان می‌دهد که در دورهٔ مورد مطالعه، میزان افزایش قابل توجهی در سطح آموزشی حوضه وجود داشته، که می‌تواند به مشارکت اجتماعی در IWRM کمک کند.

با توجه به پارامتر وضعیت سیاست‌گذاری (ظرفیت سازمانی حوضه)، اگر چه چارچوبی قانونی وجود دارد (قوانین و مقررات آب و قوانین زیست محیطی دولت و فدرال)، اما در مدیریت منابع آب، مشارکت کمی در دوره مورد مطالعه وجود داشت. حوضهٔ رودخانه SF Verdadiiro همچنان کمیته یا انجمن حوضه‌ای ندارد، که طبق قانون، موسسهٔ مسئول مدیریت آب در سطح حوضه باشد؛ در نتیجه، حوضه در این مورد ضعیف بوده و امتیاز پارامتر مربوط به آن ۰/۲۵ بود.

با توجه به پارامتر واکنش سیاست‌گذاری، تکامل هزینه‌های حوضه در مدیریت منابع آب در دوره پنج ساله ۵٪ + بود و برای این پارامتر به امتیاز ۰/۷۵ رسید. مقدار زیرشاخص کلی سیاست‌گذاری به طور متوسط از میانگین سه پارامتر ۰/۵۸= ۳/(۰/۷۵+۰/۲۵+۰/۷۵) محاسبه شد.

۵- پایداری حوضه‌آبریز:

شاخص WSI میانگین جهانی چهار زیر شاخص (H، E، L، P) است. با اعمال معادله (۱) و با استفاده از یک صفحه گستردهٔ الکترونیکی، نمره کل ۰/۶۵ برای شاخص WSI در حوضه SF Verdadeiro بدست آمد. جدول (۳) سطوح، امتیازات و WSI کلی برای حوضه را ارائه می‌دهد.

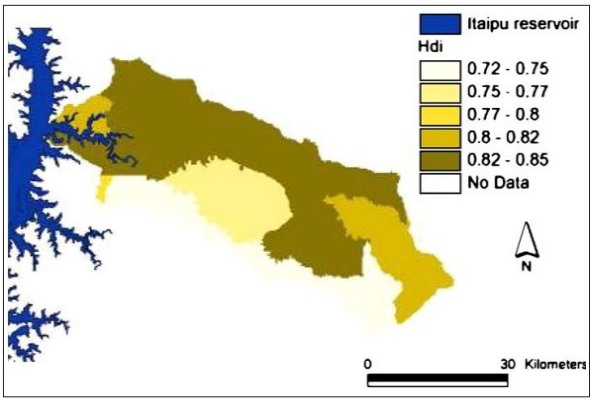
جدول ۳- سطوح و مقادیر پارامترها و WSI حوضه

زیرشاخص	فشار		وضعیت		واکنش		نتایج
	سطح	امتیاز	سطح	امتیاز	سطح	امتیاز	
هیدرولوژی	۴/۸	۰/۷۵	۳۳۶۰۰	۱	متوسط	۰/۵	
	۴/۶	۰/۵	۱/۳	۱	ضعیف	۰/۲۵	
		۰/۶۳		۱		۰/۳۸	۰/۶۷
محیط‌زیست	۱۱	۰/۲۵	٪۲۶	۰/۷۵	٪۲	۰/۷۵	۰/۵۸
معیشت	۳/۴	۰/۷۵	۰/۸۱	۰/۷۵	٪۵/۱	۰/۷۵	۰/۷۵
سیاست‌گذاری	۶/۳	۰/۷۵	ضعیف	۰/۲۵	٪۵	۰/۷۵	۰/۵۸
نتایج		۰/۵۹		۰/۷		۰/۶۶	۰/۶۵

با استفاده از طبقه‌بندی مشابه به عنوان HDI برای UNDP (کم برای HDI کمتر از ۰/۵، متوسط برای HDI بین (۰/۸-۰/۵) و بالا برای HDI بزرگتر از ۰/۸)، WSI برای حوضه SF Verdadeiro (۰/۶۵) در سطح متوسط قرار گرفت. علاوه بر این، طبق جدول (۵)، زیرشاخص‌های با کمترین امتیازات عبارت از سیاست‌گذاری و محیط‌زیست با امتیاز (۰/۵۸) و بالاترین امتیاز آن مربوط به زیرشاخص معیشت (۰/۷۵) بود.

با توجه به ستون کلی پارامترهای فشار، وضعیت و واکنش، کمترین امتیاز برای پارامتر فشار (۰/۵۹) و بالاترین برای پارامتر وضعیت (۰/۷) بدست آمد. این شاخص نشان می‌دهد که اگرچه شرایط

حوضه درحال حاضر (وضعیت) خوب است، اما فشاری (به خصوص محیط زیست) وجود دارد که پایداری آن را تهدید می‌کند. به طور خاص، ضعیف‌ترین ترکیب‌های شاخص در جدول (۵) پارامتر فشار محیط‌زیست (۰/۲۵)، وضعیت سیاست‌گذاری (۰/۲۵) و پارامتر واکنش هیدرولوژی (۰/۳۸) بود. بنابراین، مصرف‌کنندگان آب، گرودارن و تصمیم‌گیران منابع آب در حوضه، بایستی به منظور بهبود پایداری کلی حوضه و کاهش فشار روی پوشش گیاهی باقی‌مانده، موثرتر کار کنند.



شکل ۲- توزیع مکانی شاخص توسعه انسانی (مبنا سال ۱۹۹۶) در حوضه SF Verdadeiro

بحث

به منظور سادگی و کاربرد بیشتر، شاخص پایداری حوضه که در این مطالعه ارائه شده است، از تعداد نسبتاً کمی از زیرشاخص‌ها و پارامترها استفاده می‌کند. همچنین ساختار افزایشی با وزن‌های برابر زیر شاخص و یک ساختار علت و معلول (فشار-وضعیت-واکنش) ترجیح داده شده است، زیرا آنها شاخص را شفاف‌تر و قابل‌قبول‌تر برای گرودارن و تصمیم‌گیرندگان می‌سازند. این‌ها مسائل مهمی هستند، اما مسائل مربوط به ارزیابی و مدل‌سازی حوضه‌ها اغلب مورد توجه قرار نگرفته‌اند.

یکی دیگر از مزیت‌های ساختار افزایشی و ویژگی‌های محاسبه شاخص WSI، این است که برآورد نادرست یکی از زیر شاخص‌ها ممکن است توسط برآورد بیش از حد در یکی دیگر از زیرشاخص‌ها جبران شود. از آنجا که پارامترهای معادله (۱) وزن مشابه دارند و با توجه به این که زیرشاخص‌ها و پارامترها متغیرهای تصادفی هستند (با توزیع‌های متناظر)، اصل شانون حداکثر آنتروپی حاکی از آن است که احتمال پارامتر کمتر و بیشتر از حد تخمین زده شده، یکسان است (Harr، ۱۹۸۷).

اگر چه چهار زیرشاخص و ۱۵ پارامتر ممکن است کل طیف پایداری را نداشته باشند، استفاده از زیرشاخص‌ها و متغیرهای بیشتر، مانع از کاربرد آن می‌شود، به ویژه در حوضه‌هایی که کمبود اطلاعات دارند (Netter و همکاران، ۱۹۸۵).

شاخص WSI در بعضی موارد می‌تواند امتیازات بالایی داشته باشد، در حالی که یکی از زیر شاخص‌های آن کم است، زیرا امتیاز شاخص، میانگین سه پارامتر (فشار، وضعیت و واکنش) است. با این حال، بعید است که تمام پارامترها (فشار، وضعیت و واکنش) در همان زمان کم باشند.

شاخص WSI می‌تواند در فواصل زمانی مختلف براساس تکامل پایداری حوضه‌آبریز طی سال‌ها، به گرودارن و مدیران آب در فرآیند برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری و ارائه ابزار مدیریتی سازگار، کمک کند. اگرچه نتایج تنها یک حوضه ارائه شده است، WSI می‌تواند برای سایر حوضه‌های آمریکای جنوبی، آفریقا و اقیانوسیه اعمال شود. نتایج این حوضه‌ها برای مقایسهٔ پایداری در میان حوضه‌ها مفید می‌باشند.

نتیجه‌گیری

مسائلی چندگانه بر پایداری آب حوضه‌آبریز تأثیر می‌گذارند. در میان آنها مسائل اجتماعی، اقتصادی و محیط‌زیستی است. با این حال، آنها اغلب به طور جداگانه و نه به عنوان یک فرآیند یکپارچه و پویا، بررسی می‌شوند. به منظور ادغام مسائل هیدرولوژیکی، محیط‌زیستی، معیشت و سیاست‌گذاری، و همچنین فشارهای موجود و پاسخ‌های سیاستی در یک شاخص کمی، پویا وجامع، شاخص پایداری حوضه‌آبریز (WSI) برای حوضه‌های آبریز پیشنهاد شده است. این شاخص ساده است و از اطلاعاتی که به آسانی در دسترس است، استفاده می‌کند. خصوصیات پویایی آن به منظور برآورد فشارها و پاسخ‌های مربوط به انسان، محیط‌زیست و اقلیم است که می‌تواند پایداری حوضه را تحت تأثیر قرار دهد.

در حوضه رودخانه SF Verdadeiro (جنوب برزیل)، در دورهٔ بین سال‌های ۱۹۹۶ تا ۲۰۰۰، مقدار شاخص WSI، ۰/۶۵ بود که نشان‌دهندهٔ سطح متوسط پایداری حوضه است. معیارهای مورد نیاز گرودارن و تصمیم‌گیرندگان در این حوضه مربوط به فشارهای محیط‌زیستی، وضعیت سیاست‌گذاری و واکنش پارامتر هیدرولوژی، یعنی حفاظت از پوشش گیاهی باقیمانده، بهبود سیاست‌های واقعی مدیریت منابع آب و کاهش آلودگی فاضلاب می‌باشد.

پی‌نوشت

1- Watershed Sustainability Index
2- Hydrology, Environment, Life, and Policy
3- Human Development Index
4- HDI-Income
5- HDI-Education