به‌نام خدا

دانشگاه تهران

پردیس دانشکده‌های فنی

دانشکده مهندسی عمران

تدوین الگویی برای ارزیابی تاب‌آوری سناریوهای مدیریت خدمات اکوسیستم هیدرولوژیکی در حوضه‌های آبریز

رساله برای دریافت درجه دکتری تخصصی

در رشته مهندسی عمران- مهندسی و مدیریت منابع آب

نام دانشجو:

مسعود بهبودیان

استاد راهنما:

دکتر رضا کراچیان

تابستان ۱۴۰۰

بسم الله الرحمن الرحيم

تعهدنامه اصالت اثر

باسمه تعالی

اینجانب مسعود بهبودیان تأیید می‌کنم که مطالب مندرج در این رساله حاصل کار پژوهشی اینجانب است و به دستاوردهای پژوهشی دیگران که در این نوشته از آنها استفاده شده است مطابق مقررات ارجاع گردیده است. این رساله قبلاً برای احراز هیچ مدرک هم‌سطح یا بالاتر ارائه نشده است.

کلیه حقوق مادی و معنوی این اثر متعلق به دانشکده فنی دانشگاه تهران است.

نام و نام خانوادگی دانشجو : مسعود بهبودیان

امضای دانشجو :

تشکر و قدردانی

پیش از هرچیز، لازم است از زحمات بی‌دریغ استاد بزرگوارم جناب آقای دکتر رضا کراچیان تشکر کنم. در مدت فعالیت تحت نظر ایشان، علاوه بر مسائل علمی که در آن اسوه هستند، اخلاق حرفه‌ای را از ایشان آموختم. بابت تمام راهنمایی‌ها، همراهی‌ها و صبوری‌های استادانه، صمیمانه از ایشان تشکر می‌کنم.

همچنین، از اساتید گرانقدر جناب آقای دکتر محمد کارآموز، جناب آقای دکتر سید حسن قدسی‌پور، جناب آقای دکتر محمدرضا نیکو و سرکار خانم دکتر سارا نظیف که از نظرات ارزشمندشان در راستای ارتقاء کیفیت این اثر بهره‌مند شدم، بسیار سپاسگزارم.

از ستاد احیای دریاچهٔ ارومیه به دلیل حمایت مالی از رسالهٔ اینجانب با شماره قرارداد 1399-UT-006 قدردانی می‌کنم.

از دوستان بزرگوارم، جناب آقای مهندس کسری مطلق‌زاده، سرکار خانم مهندس پرستو پورمقیم، جناب آقای مهندس سعید اشرفی، جناب آقای مهندس زاهد خسروی، سرکار خانم مهندس رضوانه قربانی، سرکار خانم مهندس سارا انامقی و جناب آقای مهندس مجید کامیاب که در مراحل مختلف رساله به بنده کمک زیادی کردند، صمیمانه تشکر می‌کنم.

از استاد ارجمند، سرکار خانم دکتر مهجوری نیز به دلیل راهنمایی‌هایشان صمیمانه تشکر می‌کنم.

در نهایت، از زحمات خانواده عزیزم، به‌ویژه مادر مهربان، برادران بزرگوار و خواهران ارجمندم تشکر و قدردانی می‌کنم. امیدوارم لایق فداکاری‌ها و مهربانی‌های بی‌حدشان باشم.

چکیده

در سال‌های اخیر، ارزیابی تاب‌آوری سیاست‌های مدیریت منابع آب به‌خصوص در شرایط حدی مورد توجه ویژه پژوهشگران قرار داشته است. از طرف دیگر، بحث مدیریت منابع آب در سال‌های اخیر از مدیریت تأمین نیازهای شهری، کشاورزی و صنعتی به بحث تأمین خدمات اکوسیستم گسترش یافته است. مرور پیشینه مطالعات نشان می‌دهد تاب‌آوری خدمات اکوسیستم هیدرولوژیکی و سناریوهای مدیریتی برای بهبود آن در سطح حوضه آبریز با توجه به دسته‌های مختلف تاب‌آوری به‌صورت مناسب ارزیابی نشده است. همچنین، از اصول هفت‌گانهٔ تاب‌آوری خدمات اکوسیستم شامل حفظ تنوع و افزونگی، مدیریت ارتباطات، مدیریت متغیرهای کُند و بازخوردها، پرورش تفکر سامانه سازگارشوندهٔ پیچیده، تشویق به یادگیری و کسب تجربه، گسترش مشارکت و توسعهٔ حکمرانی چندمرکز در سامانه‌ها در ارزیابی آن به شکل مناسبی استفاده نشده است. علاوه بر این، با توجه به وجود گرودارن مختلف در حوضه آبریز، برای تصمیم‌گیری در تعیین سناریوهای مناسب مدیریتی لازم است قدرت، جایگاه سازمانی و مطلوبیت‌ها و محدودیت‌های گرودارن به شکل مناسبی در نظر گرفته شوند. این موضوع نیز در پژوهش‌های پیشین به شکل کاملی لحاظ نشده است.

در این رساله، مدل فرایندمحورِ هیدرولوژیکیِ واسنجی شدهٔ SWAT برای شبیه‌سازی محدودهٔ مورد مطالعه استفاده می‌شود. در مرحلهٔ بعد، از خروجی‌های این مدل در مدل تخصیص منابع آب MODSIM و در فرایند تصمیم‌گیری چندعامله-چندمعیاره استفاده می‌شود. محدوده مورد مطالعه در این رساله، حوضهٔ آبریز رودخانه زرینه‌رود است که تاکنون توسط ستاد احیای دریاچه ارومیه و سازمان‌ها و پژوهشگران دیگر مطالعات متنوعی در مورد مدیریت منابع و مصارف این حوضه صورت پذیرفته است. سناریوهای مدیریت خدمات اکوسیستم هیدرولوژیکی در این محدوده از نتایج مطالعات قبلی استخراج شده‌اند. در ادامه، تحلیل تاب‌آوری سناریوهای عرضه و تقاضای خدمات اکوسیستم هیدرولوژیکی با در نظر گرفتن تمام دسته‌های تاب‌آوری شامل ۱) تاب-آوری مربوط به حداکثر تنش قابل تحمل بدون عبور از آستانهٔ عملکرد؛ ۲) تاب‌آوری سامانه در نحوهٔ پاسخ‌دهی به بحران و برگشت‌پذیری آن بعد از شرایط بحرانی؛ و ۳) تاب‌آوری در رابطه با ظرفیت سازگارشوندگی سامانه و مدیریت آن و اصول هفت‌گانهٔ ارزیابی تاب‌آوری خدمات اکوسیستم انجام می‌شود. برای تحلیل تاب‌آوری، از معیارهای مناسبی همچون جذب کربن (مقدار کربن جذب شده توسط محصولات کشاورزی به‌عنوان یک شاخص مناسب برای در نظر گرفتن اثرات مختلف سناریوهای مدیریتی بر تعادل کربن در اکوسیستم) و کیفیت هوا از نظر گردوغبار استفاده می‌شود. در این رساله، تاب‌آوری در برابر رخدادهای شدید با احتمال وقوع نامشخص در سناریوهای مختلف تغییر اقلیم به‌صورت ماهانه و در دو دورهٔ زمانی آینده ۲۰۵۰-۲۰۲۰ و ۲۱۰۰-۲۰۲۰ ارزیابی می‌شود. سپس تغییرات ماهانهٔ معیار تاب‌آوری توسعه داده شده در این رساله در برابر رخدادهای شدید، با معیارهای عملکرد بلندمدت کلاسیک مثل اطمینان‌پذیری، برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری مقایسه می‌شوند. با توجه به وجود گرودارن با جایگاه سازمانی مختلف و مطلوبیت‌های متفاوت، از ترکیب بازی پیشرو-

پیرو و نظریهٔ استنتاج شهودی (ER) برای تعیین سناریوهای برتر استفاده می‌شود. در این راستا، ابتدا پیشروها سناریوهای مدیریتی مناسب پیشنهاد می‌کنند و پیروهای موجود در سطوح پایین‌تر، بر اساس معیارهای خود سناریوها را ارزیابی می‌کنند. در مرحلهٔ بعد، سناریوهای انتخاب شده توسط سطوح پایین‌تر به پیشروها گزارش داده می‌شود. سپس، پیشروها با توجه به معیارهای خودشان، بهترین سناریوی مدیریت خدمات اکوسیستم هیدرولوژیکی را انتخاب می‌کنند. علاوه بر این، با توجه به نوع اطلاعات در دسترس، علاوه بر بازی با اطلاعات کامل و انتخاب قطعی سناریوی بهینه، از بازی با اطلاعات ناکامل نیز برای در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها و انتخاب احتمالی سناریوی بهینه استفاده می‌شود.

نتایج نشان دادند با توسعهٔ معیار تاب‌آوری خدامت اکوسیستم هیدرولوژیکی با در نظرگیری دسته‌های مختلف و اصول هفت‌گانهٔ آن، ارزیابی آن در برابر رخدادهای شدید با احتمال وقوع نامشخص به شکل کامل‌تری انجام می‌شود و تغییرات زمانی تاب‌آوری به‌خوبی نشان داده می‌شود. همچنین، نتایج نشان دادند که استفاده از معیارهای عملکرد بلندمدت برای ارزیابی تاب‌آوری سامانه مناسب نیست و تغییرات زمانی معیارهای مربوطه در برابر رخدادهای شدید با احتمال وقوع نامشخص نوسانات زیادی دارد. در مرحلهٔ بعد، برای ارزیابی تاب‌آوری در برابر رخدادهای شدید، از معیار توسعه داده شده در این رساله و مبتنی بر اصول هفت‌گانهٔ تاب‌آوری خدمات اکوسیستم استفاده شد و نتایج نشان دادند حوضهٔ آبریز زرینه‌رود بدون اجرای سناریوی مدیریت خدمات اکوسیستم هیدرولوژیکی، از وضعیت مناسبی برخوردار نیست (میانگین تاب‌آوری در برابر رخدادهای شدید حدود ۰/۴ است). در مرحلهٔ بعد و برای بهبود وضعیت تاب‌آوری حوضهٔ آبریز مورد مطالعه، ۱۲۸ سناریوی مدیریت خدمات اکوسیستم هیدرولوژیکی متناسب با پروژه‌های پیشنهادی توسط ستاد احیای دریاچهٔ ارومیه تعریف شدند. سپس، فرایند تصمیم‌گیری چندعامله-چندمعیاره با توجه به نوع اطلاعات در دسترس، تحت سه بازی با اطلاعات صریح، بازی با اطلاعات بازه‌ای و بازی با اطلاعات فازی به کار گرفته شد. نتایج نشان دادند سناریوی *MSC1346* می‌تواند به عنوان بهترین سناریوی مدیریتی در هر سه نوع بازی و تحت سناریوهای مختلف تغییر اقلیم انتخاب شود. این سناریو شامل چهار بستهٔ مدیریتی P_1، P_3، P_4 و P_6 است و به ترتیب مربوط به تأمین آب برای دریاچه از منابع جدید، تسهیل و افزایش حجم آب ورودی به دریاچه، بهسازی شبکه آبیاری و زهکشی و تأسیسات مربوطه و پروژه‌های بهسازی کشاورزی با هزینه متوسط هستند. اجرای این سناریو می‌تواند به افزایش تراز دریاچه ارومیه تا حدود ۱۲۷۳/۸۹ متر (تراز کنونی ۱۲۷۱/۳) طی ۳۰ سال آینده منجر شود که نشان از اثربخشی مناسب سناریوی انتخابی بر بهبود شرایط دریاچه دارد. همچنین اجرای این سناریو منجر به بهبود مقدار تاب‌آوری خدمات اکوسیستم هیدرولوژیکی تا حدود ۰/۶۵ شد که نشان از بهبود وضعیت تأمین خدمات اکوسیستم همچون تأمین آب و غذا و تنظیم خدماتی همچون کیفیت هوا است.

کلید واژه‌ها: مدل شبیه‌سازی SWAT، MODSIM، تاب‌آوری خدمات اکوسیستم هیدرولوژیکی، اصول هفت‌گانهٔ تاب‌آوری، عدم قطعیت، رویکرد پیشرو- پیرو، نظریهٔ استنتاج شهودی

فهرست مطالب

فصل اول :بررسی اهمیت، ضرورت و هدف از انجام تحقیق ۱
۱-۱- بیان مسأله و اهداف رساله ۱
۱-۲- سوالات اساسی تحقیق ۴
۱-۳- فرض‌های ساده‌کننده تحقیق ۵
۱-۴- نوآوری‌های رساله ۵
۱-۵- ساختار رساله ۶
فصل دوم: مرور پیشینهٔ مطالعات ۷
۲-۱- پیشینهٔ مطالعات در زمینهٔ مدل‌های شبیه‌سازی و تحلیل خدمات اکوسیستم در حوضه‌های آبریز ۷
۲-۱-۱- مدل‌های شبیه‌سازی چرخهٔ هیدرولوژیکی ۷
۲-۱-۲- تحلیل خدمات اکوسیستم در سامانه‌های منابع آب ۷
۲-۱-۳- مدل‌های تخصیص منابع آب در حوضه‌های آبریز ۱۱
۲-۲- پیشینهٔ مطالعات در زمینهٔ تاب‌آوری سامانه‌های منابع آب ۱۱
۲-۳- پیشینهٔ مطالعات در زمینهٔ تحلیل گرواران و تحلیل شبکهٔ اجتماعی ۲۳
۲-۴- پیشینهٔ مطالعات در زمینه مدلهای تصمیم‌گیری چندعامله- چندمعیاره در انتخاب سناریوی مناسب ۲۶
۲-۵- جمع‌بندی ۳۶
فصل سوم: متدولوژی (روش‌شناسی) ۳۸
۳-۱- جمع‌آوری اطلاعات مورد نیاز(بخش اول فلوچارت) ۳۸
۳-۲- ساخت مدل هیدرولوژیکی SWAT و واسنجی آن (بخش دوم و سوم فلوچارت) ۴۰
۳-۲-۱- ساخت مدل SWAT ۴۰
۳-۲-۲- به‌کارگیری نرم‌افزار SWAT-CUP ۴۲
۳-۳- مدل تخصیص آب MODSIM ۴۳
۳-۴- تعریف سناریوهای تغییر اقلیم ۴۴
۳-۵- خدمات اکوسیستم هیدرولوژیکی ۴۵
۳-۶- ارزیابی تاب‌آوری و سناریوهای مدیریت آن در محدوده مطالعاتی(بخش چهارم فلوچارت) ۴۷
۳-۶-۱- تعریف تاب‌آوری در این رساله از جنبه‌های مختلف ۴۸
۳-۶-۲- تعیین چارچوب ارزیابی تاب‌آوری ۵۰
۳-۶-۳- نظریه استنتاج شهودی ۵۷

۳-۶-۴- اطمینان‌پذیری ۶۰
۳-۶-۵- برگشت‌پذیری ۶۱
۳-۶-۶- آسیب‌پذیری ۶۲
۳-۶-۷- تاب‌آوری سامانه‌های اجتماعی- اکولوژیکی ۶۳
۳-۶-۸- توسعهٔ معیاری برای محاسبهٔ تاب‌آوری در برابر رخدادهای با احتمال وقوع نامشخص ۷۲
۳-۷- تعیین سناریوهای مدیریت تاب‌آوری بر اساس مفهوم زنجیرهٔ تأمین-تسهیل-کنترل ۸۱
۳-۸- تحلیل گرودارن و تحلیل شبکهٔ اجتماعی (بخش پنجم فلوچارت) ۸۳
۳-۹- تلفیق بازی پیشرو -پیرو ونظریه استنتاج شهودی برای تعیین سناریوهای مناسب (بخش پنجم فلوچارت) ۸۴
۳-۹-۱- الگوریتم تعیین سناریو(های) بهینه گرودارن برای ارائهٔ خدمات اکوسیستم هیدرولوژیکی (بخش ششم فلوچارت) ۸۵
۳-۹-۱-۱- تعیین سناریوهای بهینه از دیدگاه صریح ۸۶
۳-۹-۱-۲- تعیین سناریوهای بهینه از دیدگاه بازه‌ای ۸۸
۳-۱۰- خلاصه و جمع‌بندی ۹۴
فصل چهارم: محدودهٔ مورد مطالعه ۹۶
۴-۱- مقدمه ۹۶
۴-۲- کلیات حوضهٔ آبریز دریاچهٔ ارومیه ۹۶
۴-۳- شرایط اکولوژیکی دریاچهٔ ارومیه ۹۸
۴-۴- نوسانات دریاچهٔ ارومیه ۹۹
۴-۴-۱- اقلیم منطقه ۱۰۰
۴-۵- حوضهٔ آبریز زرینه‌رود ۱۰۳
۴-۶- تأسیسات انتقال آب و شبکهٔ آبیاری در حوضهٔ زرینه‌رود ۱۰۵
۴-۶-۱- سد مخزنی بوکان ۱۰۵
۴-۶-۲- بند انحرافی نوروزلو ۱۰۶
۴-۶-۳- شبکهٔ آبیاری و زهکشی زرینه‌رود ۱۰۶
۴-۶-۴- شبکهٔ آبیاری و زهکشی دشت رحیم‌خان ۱۰۷
۴-۷- منابع و مصارف آب در بخش‌های مختلف نیاز حوضهٔآبریز زرینه‌رود ۱۰۸
۴-۸- بیلان آب زیرزمینی دشت میاندوآب ۱۰۹
۴-۹- ستاد احیا و نقش آن در حل مشکل دریاچه ارومیه ۱۱۰

۴-۱۰- فرآیند تصویب و تخصیص بودجهٔ مورد نیاز پروژه‌ها در این حوضه ۱۱۳
فصل پنجم: نتایج ۱۱۵
۵-۱- مقدمه ۱۱۵
۵-۲- به‌کارگیری مدل شبیه‌سازی SWAT در محدودهٔ مورد مطالعه ۱۱۵
۵-۳- بررسی صحت مدلSWAT ۱۱۸
۵-۳-۱- راندمان آبیاری ۱۱۸
۵-۳-۲- صحت‌سنجی افت آب زیرزمینی در مدل شبیه‌سازی ۱۱۹
۵-۳-۳- صحت‌سنجی تبخیر-تعرق مدل شبیه‌سازیSWAT ۱۱۹
۵-۴- تعریف سناریوهای تغییر اقلیم ۱۲۱
۵-۵- وارد کردن داده‌های جریان آب به مدل MODSIM ۱۲۱
۵-۶- تعریف سناریوهای عرضهٔ خدمات اکوسیستم هیدرولوژیکی ۱۲۴
۵-۷- مدل‌سازی سناریوهای عرضهٔ خدمات اکوسیستم هیدرولوژیکی ۱۳۳
۵-۸- محاسبهٔ معیارهای مبتنی بر تاب‌آوری (تاب‌آوری دستهٔ اول) ۱۳۸
۵-۹- محاسبهٔ تاب‌آوری در برابر رخدادهای با احتمال نامشخص (تاب‌آوری دستهٔ دوم) ۱۴۱
۵-۱۰- بازی پیشرو-پیرو مبتنی بر رویکرد استنتاج شهودی ۱۶۲
۵-۱۰-۱- تعیین سناریوی بهینه با استفاده از بازی پیشرو-پیرو با اطلاعات صریح (بازی نوع اول) ۱۶۶
۵-۱۰-۲- تعیین سناریوی بهینه با استفاده از بازی پیشرو-پیرو با اطلاعات صریح-بازه‌ای (بازی نوع دوم) ۱۷۶
۵-۱۰-۳- تعیین سناریوی بهینه با استفاده از بازی پیشرو-پیرو با اطلاعات صریح-فازی (بازی نوع سوم) ۱۸۰
۵-۱۱- خلاصه و جمع‌بندی ۱۸۲
فصل ششم: جمع‌بندی و پیشنهادها ۱۸۴
۶-۱- جمع‌بندی ۱۸۴
۶-۲- پیشنهادها ۱۹۰
مراجع ۱۹۲
پیوست اول ۲۰۷
پیوست دوم ۲۵۳
پیوست سوم ۲۶۷
پیوست چهارم ۲۷۵

فهرست اشکال

شکل ۳- ۱- ساختار کلی متدولوژی پیشنهادی برای ارزیابی سناریوهای عرضهٔ خدمات اکوسیستم هیدرولوژیکی با توجه به ساختار سلسله مراتبی گرودارن ۳۹
شکل ۳- ۲- چارچوب Safe & SuRe برای بررسی شکست‌های بالقوهٔ سامانه و رخدادهای ممکن..... ۵۳
شکل ۳- ۳- حالت‌های مختلف برای بررسی امکان محاسبه تاب‌آوری در مقابل یک رخداد یا شکست به‌خصوص ۵۴
شکل ۳- ۴- حالت‌های مختلف برای بررسی امکان محاسبه تاب‌آوری در مقابل هر رخداد یا شکست..... ۵۶
شکل ۳- ۵- الگوریتم نمرات ارزیابی (برآورد درجه‌های باور) یک معیار با استفاده از سری زمانی آن..... ۶۰
شکل ۳- ۶- بسته‌های مطالعاتی و اجرایی طرح احیای دریاچهٔ ارومیه ۸۳
شکل ۳- ۷- فرآیند یک بازی پیشرو-پیرو دوسطحی با استفاده از استقرای بازگشتی ۹۰
شکل ۳- ۸- دو رویکرد متفاوت در تعیین نتیجهٔ بازی دوسطحی فرضی ۹۱
شکل ۴- ۱- مشخصات عمومی حوضهٔ آبریز دریاچه ارومیه به تفکیک استانهای موجود ۹۷
شکل ۴- ۲- سهم آبدهی رودخانه‌های حوضهٔ آبریز دریاچهٔ ارومیه ۹۸
شکل ۴- ۳- تغییرات سطح و حجم دریاچهٔ ارومیه طی سال‌های ۴۵-۱۳۴۴ تا ۹۸-۱۳۹۷ ..... ۹۹
شکل ۴- ۴- تغییرات تراز دریاچهٔ ارومیه طی سال‌های ۴۵-۱۳۴۴ تا ۹۸-۱۳۹۷..... ۱۰۰
شکل ۴- ۵- بارش سالانهٔ حوضهٔ آبریز دریاچهٔ ارومیه طی سال‌های ۱۳۷۴ تا ۱۳۹۸..... ۱۰۲
شکل ۴- ۶- موقعیت حوضهٔ آبریز رودخانه زرینه‌رود در ایران و زیرحوضه‌های آن ۱۰۴
شکل ۴- ۷- نمودار شماتیک رودخانه‌ها در حوضه آبریز رودخانه زرینه‌رود..... ۱۰۴
شکل ۴- ۸- منحنی حجم -سطح سد بوکان پس از افزایش ارتفاع..... ۱۰۶
شکل ۴- ۹- عرضه و تقاضای سالانه بخش‌های مختلف نیاز در حوضهٔ زرینه‌رود طی سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۵..... ۱۰۹
شکل ۴-۱۰- فرایند تصویب اعتبارات پروژه‌های احیا دریاچه ارومیه ۱۱۴
شکل ۵- ۱- واسنجی و صحت‌سنجی مدل SWAT در نقطهٔ خروجی حوضهٔ آبریز زرینه‌رود (معادل ورودی دریاچهٔ ارومیه)..... ۱۱۷
شکل ۵- ۲- واسنجی و صحت‌سنجی مدل SWAT برای جریان ورودی ماهانه سد بوکان..... ۱۱۸
شکل ۵- ۳- تغییرات افت تجمعی سالانه آب زیرزمینی تخمین زده شده توسط مدل SWAT در مقابل اطلاعات مشاهداتی..... ۱۲۰
شکل ۵- ۴- مقایسه نتایج تبخیر-تعرق برآورد شده توسط مدل و اطلاعات مشاهدات ۱۲۰
شکل ۵- ۵- شکل شماتیک منابع عرضه و تقاضای آب در منطقه مورد مطالعه..... ۱۲۳

شکل ۵- ۶- چارچوب پیشنهادی برای ارزیابی تاب‌آوری سامانه‌های منابع آب ۱۴۰
شکل ۵- ۷- روند کلی استفاده از GC برای محاسبه مقادیر معیارهای *RRV* مبتنی بر درجهٔ باور آنها..... ۱۴۱
شکل ۵- ۸- فرآیند محاسبه معیار تاب‌آوری در برابر رخدادهای با احتمال نامشخص (*7PR*) با استفاده از رویکرد TPER مبتنی بر قانون GC ۱۴۴
شکل ۵- ۹- سری زمانی معیارهای مبتنی بر تاب‌آوری برای سناریوی پایه تحت سناریوی تغییر اقلیم RCP 4.5 و دوره زمانی ۲۰۵۰-۲۰۲۰ ..... ۱۵۹
شکل ۵- ۱۰- سری زمانی معیارهای مبتنی بر تاب‌آوری برای سناریوی پایه تحت سناریوی تغییر اقلیم RCP 4.5 و دوره زمانی ۲۱۰۰-۲۰۲۰..... ۱۶۰
شکل ۵- ۱۱- سری زمانی معیارهای مبتنی بر تاب‌آوری برای سناریوی حاوی تمامی بسته‌ها تحت سناریوی تغییر اقلیم RCP 4.5 و دوره زمانی ۲۰۵۰-۲۰۲۰..... ۱۶۱
شکل ۵- ۱۲- سری زمانی معیارهای مبتنی بر تاب‌آوری برای سناریوی حاوی تمامی بسته‌ها تحت سناریوی تغییر اقلیم RCP 4.5 و دوره زمانی ۲۱۰۰-۲۰۲۰..... ۱۶۱
شکل ۵- ۱۳- معیارهای جدید تعریف شده مبتنی بر معیار *7PR* برای استفاده در فرآیند تصمیم‌گیری.... ۱۶۳
شکل ۵- ۱۴- فرآیند تصمیم‌گیری در رابطه با تصویب سناریوی مدیریتی و تخصیص بودجهٔ آن در بازی سه سطحی..... ۱۷۱
شکل ۵- ۱۵- ت مقادیر درجه‌های باور محاسبه شده در سطح اول تصمیم‌گیری برای سناریوهای منتخب در دورهٔ ۲۰۵۰-۲۰۲۰..... ۱۷
شکل ۵- ۱۶- مقادیر درجه‌های باور محاسبه شده در سطح اول تصمیم‌گیری برای سناریوهای منتخب در دورهٔ ۲۱۰۰-۲۰۲۰ ..... ۱۷۲
شکل ۵- ۱۷- مقادیر درجه‌های باور محاسبه شده برای سناریوهای مدیریتی منتخب تحت سناریوی تغییر اقلیم RCP 4.5 در دورهٔ ۲۰۵۰-۲۰۲۰..... ۱۷۵
شکل ۵- ۱۸- تغییرات سالانهٔ تراز دریاچهٔ ارومیه برای سناریوی مدیریتی منتخب تحت سناریوی تغییر اقلیم RCP 4.5 در دورهٔ ۲۰۵۰-۲۰۲۰ ..... ۱۸۲

فهرست جداول

جدول ۳- ۱- مقایسه مشخصه‌های سه دسته تاب‌آوری مختلف ۴۹

جدول ۳- ۲- درجه‌های ارزیابی به همراه تعریف آنها برای معیارهای کمّی و کیفی ۵۸

جدول ۳- ۳- معیارها و زیرمعیارهای تعریف شده برای اصلهای تاب‌آوری در این رساله ۷۳

جدول ۴- ۱- میانگین حجم آب خروجی و تبخیر از سد بوکان به تفکیک ماه (میلیون مترمکعب) ۱۰۷

جدول ۴- ۲- بیلان آب زیرزمینی آبخوان آبرفتی دشت میاندوآب ۱۱۰

جدول ۴- ۳- گروداران اصلی حوضهٔ آبریز زرینه‌رود و ارتباط با طرح احیای دریاچه ارومیه ۱۱۲

جدول ۵- ۱- پارامترهای نهائی منتخب برای سد بوکان در مدل واسنجی شده ۱۱۶

جدول ۵- ۲- منحنی فرمان و محدودیت اعمال شده در خروجی سد بوکان ۱۱۷

جدول ۵- ۳- دوره و عمق آبیاری برای محصولات مختلف در حوضه آبریز زرینه‌رود ۱۱۹

جدول ۵- ۴- نیاز آب محیط زیستی رودخانه زرینه‌رود بر اساس روش FDC-shifting (میلیون مترمکعب در ماه) ۱۲۲

جدول ۵- ۵- لیست پروژه‌های غیرمستقیم و پشتیبانیِ اختیاری و متعلق به بسته‌های اول تا هفتم ۱۳۲

جدول ۵- ۶- درصد توزیع ماهانه تقاضای گره‌های بخش کشاورزی ۱۳۵

جدول ۵- ۷- مقادیر معیارهای RRV مبتنی بر کلاس‌هایی ارزیابی تحت سناریوهای تغییر اقلیم و دوره‌های زمانی مختلف ۱۴۱

جدول ۵- ۸- محاسبهٔ درجه‌های باور زیرمعیارهای تنوع و افزونگی ۱۴۶

جدول ۵- ۹- مشخصات زیرمعیارها و نحوهٔ کمّی‌سازی آنها برای محدودهٔ مورد مطالعه ۱۵۱

جدول ۵- ۱۰- نتایج محاسبات زیرمعیارهای تبادل اطلاعات و مقادیر نرمال شدهٔ آنها ۱۵۷

جدول ۵- ۱۱- نتایج محاسبات زیرمعیارهای مشارکت و مقادیر نرمال شدهٔ آنها ۱۵۸

جدول ۵- ۱۲- نتایج محاسبات زیرمعیارهای مرکزیت جامع و مقادیر نرمال شدهٔ آنها ۱۵۹

جدول ۵- ۱۳ هزینهٔ اجرای بسته‌های تعریف شده در این رساله ۱۶۵

جدول ۵- ۱۴- وزن‌های نسبی سطوح دوم و سوم با استفاده از نتایج تحلیل شبکهٔ اجتماعی و روش OWA ۱۶۸

جدول ۵- ۱۵- وزن‌های نسبی معیارهای تصمیم‌گیری از دید گروداران سطوح مختلف تصمیم‌گیری ۱۶۹

جدول ۵- ۱۶- جزئیات فرایند انتخاب سناریوی مدیریتی بهینه تحت سناریوی تغییر اقلیم RCP 4.5 برای دورهٔ زمانی ۲۰۵۰-۲۰۲۰ ..... ۱۷۲

جدول ۵- ۱۷- بسته‌های مدیریتی منتخب و پروژه‌های آنها در سناریوی مدیریت خدمات اکوسیستم

هیدرولوژیکی بهینه در حوضه آبریز زرینه‌رود..... ۱۷۴
جدول ۵- ۱۸- وزن‌های نسبی محاسبه شده از نتایج شبکهٔ اجتماعی بدون در نظرگیری بازی پیشرو- پیرو ۱۷۴
جدول ۵- ۱۹- درجه‌های باور، رتبه و ارزش سناریوهای مدیریتی منتخب تحت سناریوی تغییر اقلیم RCP 4.5 در دورهٔ ۲۰۵۰-۲۰۲۰ ..... ۱۷۵
جدول ۵- ۲۰- وزن‌های بازهای معیارهای ارزیابی گرودارن سطوح دوم و سوم..... ۱۷۷
جدول ۵- ۲۱- احتمال تخصیص بودجه از طرف بازیکنان سطح سوم برای سناریوهای مدیریتی تحت سناریوی تغییر اقلیم RCP 4.5 و دورهٔ زمانی ۲۰۵۰-۲۰۲۰..... ۱۷۹
جدول ۵- ۲۲- وزن‌های نسبی گرودارن سطوح دوم و سوم در بازه‌های مختلف α..... ۱۸۱

فصل اول: بررسی اهمیت، ضرورت و هدف از انجام تحقیق

۱-۱- بیان مسأله و اهداف رساله

در سامانه‌های منابع آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک، در اثر تغییر اقلیم و همچنین افزایش تقاضای آب ممکن است تأمین نیازهای آبی و ارائهٔ خدمات اکوسیستم[1]هیدرولوژیکی با اختلال مواجه شود. بنابراین، لازم است ساختارها و رویکردهای مدیریتی بهبود یابند تا جامعهٔ انسانی و محیط‌زیست به‌صورت مناسب و پایدار به حیات خود ادامه دهند. در سامانه‌های منابع آب، به‌منظور دستیابی به این امر، مفهوم تاب‌آوری[2]مد نظر قرار گرفته است. تاب‌آوری چشم‌اندازی برای تحلیل سامانه‌ها است، به نحوی که نیاز به شناخت و مدیریت تغییرهای غیرمنتظره لازم و ضروری است. سامانه‌های اجتماعی-اکولوژیکیِ[3] تاب‌آور دارای ظرفیت خودسازگارشوندگی هستند به‌طوری که ظرفیت بیشتری را برای به‌کارگیری خدمات موردنظر ارائه می‌دهند. به عبارت دیگر، این سامانه‌ها ظرفیت خودسازگارشوندگی و خودسازمان‌دهی یا ظرفیت یادگیری در برابر اختلال‌ها (درونی یا بیرونی) را دارند و مشخصهٔ اصلی آنها پویایی غیرخطی است (قربانی، ۱۳۹۹). برای ارزیابی تاب‌آوری سامانه‌های منابع آب، معیارهایی وجود دارند که برای تحلیل وضعیت سامانه در برابر رخدادهای شدید با احتمال وقوع مشخص و نامشخص قابل استفاده هستند؛ با این حال، ارزیابی جامع تاب‌آوری خدمات اکوسیستم نیازمند معیارهای مرتبط با این مسئله است. خدمات اکوسیستم مزایایی هستند که بشر از طبیعت دریافت می‌کند. ارزیابی معیارهای عملکرد سامانه در ارائه خدمات اکوسیستم همچون اعتمادپذیری[4]، برگشت-پذیری[5]، آسیب‌پذیری[6] و تاب‌آوری سیستم در برابر رخدادهای حدّی با احتمال وقوع نامشخص از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. بنابراین، یکی از اهداف مهم این رساله، ارزیابی تاب‌آوری عرضه و تقاضای خدمات اکوسیستم هیدرولوژیکی است که اهمیت آن در بازگشت سامانه به تعادل اولیهٔ خود یا تعادلی با شرایط قابل قبول، فراهم آوردن ظرفیت سازگارشوندگی مناسب برای بهبود شرایط سامانه و در نهایت در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های مهم موجود است. مرور مطالعات پیشین در زمینه تاب‌آوری، نمایانگر استفاده از مفهوم تاب‌آوری در بررسی پدیدهٔ سیلاب و در موارد محدودی در مورد پدیدهٔ خشکسالی بوده است. همچنین، پیشینهٔ مطالعات ناچیزی وجود دارد که به بررسی و ارزیابی تاب‌آوری عرضه و تقاضای خدمات اکوسیستم هیدرولوژیکی با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های مهم موجود پرداخته باشند. برای تحلیل تاب‌آوری در این رساله، از مدل‌های

[1] Ecosystem services
[2] Resiliency
[3] Social-Ecological Systems
[4] Reliability
[5] Traditional Resiliency
[6] Vulnerability

شبیه‌سازی SWAT[۱] و MODSIM[۲] به ترتیب برای شبیه‌سازی فرایندهای هیدرولوژیکی در محدودهٔ مورد مطالعه و تخصیص منابع آب استفاده می‌شود. پس از واسنجی و تحلیل عدم قطعیت خروجی‌های مدلِ SWAT، از آن خروجی‌ها به‌عنوان ورودی در مدل MODSIM استفاده می‌شود و سپس از نتایج دو مدل برای تحلیل تاب‌آوری استفاده می‌شود. لازم به ذکر است در این رساله، معیار جدیدی برای ارزیابی تاب‌آوری پیشنهاد شده است که از هفت اصل معروف تاب‌آوری خدمات اکوسیستم شامل حفظ تنوع و افزونگی،[۳] مدیریت ارتباطات،[۴] مدیریت متغیرهای کند و بازخوردها،[۵] پرورش تفکر سامانه سازگارشوندهٔ پیچیده،[۶] تشویق به یادگیری و کسب تجربه،[۷] گسترش مشارکت[۸] و توسعهٔ حکمرانی چندمرکز در سامانه‌ها[۹] استفاده می‌کند. از این رو، هفت معیار متناسب با هفت اصل تاب‌آوری تعریف می‌شوند و این معیارها خود دارای زیرمعیارهای مختلف هستند. در ادامه، با استفاده از نظریهٔ استنتاج شهودی (ER)[۱۰] مبتنی بر GC[۱۱] و با رویکرد سلسله‌مراتبی، زیرمعیارها با یکدیگر تلفیق می‌شوند و در نهایت تاب‌آوری مبتنی بر درجه‌های باور[۱۲] محاسبه می‌شود.

در اصل چهارم یعنی مدیریت متغیرهای کُند و بازخوردها، معیارهای مختلف مرتبط با خدمات اکوسیستم هیدرولوژیکی تعریف می‌شوند. یکی از معیارهای مهم مرتبط با خدمات اکوسیستم شاخصی، برای ارزیابی جذب کربن است. منابع مختلفی وجود دارند که قادر به جذب کربن موجود در جو هستند. در میان این منابع، زمین‌های کشاورزی یکی از مهم‌ترین بخش‌هایی هستند که نقش مهمّی در ترسیب کربن و تنظیم اقلیم دارند. مقدار کربن جذب شده توسط محصولات کشاورزی می‌تواند به‌عنوان یک شاخص مناسب برای در نظر گرفتن اثرات مختلف سناریوهای مدیریتی بر تعادل کربن در اکوسیستم معرفی شود. لذا، شاخص NPP[۱۳] که به‌عنوان اختلاف مقدار CO_2 مصرف شده توسط گیاهان در طی فرایند فتوسنتز و مقدار CO_2 آزاد شده از گیاهان در هنگام تنفس تعریف می‌شود، می‌تواند مدنظر قرار گیرد.

---

[1] Soil and Water Assessment Tool

[۲] یک سیستم پشتیبانی تصمیم برای مدیریت حوضه‌های آبریز، که توسط دانشگاه Colorado state توسعه داده شده است.

[3] Maintaining diversity and redundancy

[4] Managing connectivity

[5] Managing slow variables and feedbacks

[6] Fostering complex adaptive systems thinking

[7] Encouraging learning and experimentation

[8] Broaden participation

[9] Promoting polycentric governance systems

[10] Evidential Reasoning (ER)

[11] Generalized Combination (GC) rule

[12] Belief degrees

[13] Net Primary Productivity

از دیگر معیارهای مهم مرتبط با خدمات اکوسیستم هیدرولوژیکی کیفیت هوا است که می‌تواند بر زندگی انسان تأثیر بگذارد. در سال‌های اخیر، به دلیل میزان انتشار قابل‌توجه گازهای گلخانه‌ای، اهمیت ارزیابی کیفیت هوا افزایش یافته است. برای همین منظور، از معیارهایی همچون ضریب آلبدو[1]برای ارزیابی کیفیت هوا می‌توان استفاده کرد. آلبدو درصد بازتاب نور از سطح یک جسم است و عوامل مختلفی بر میزان ضریب آلبدوی یک منطقه خاص تأثیرگذار هستند. از جمله این عوامل می‌توان به موقعیت جغرافیایی، کاربری اراضی، پوشش زمین، زاویه خورشید و شرایط آب و هوایی اشاره کرد. از آنجا که مقدار زیاد ضریب آلبدو منجر به افزایش اشعه (UV[2]) می‌شود، افزایش آن می‌تواند برای سلامتی انسان مضر باشد و باعث بیماری‌هایی مانند سرطان پوست شود.

برای بررسی و بهبود تاب‌آوری در حوضهٔ آبریز مورد مطالعه، می‌توان سناریوهای مدیریتی مختلفی تعریف کرد. یکی دیگر از اهداف مهم این رساله، تعیین بهترین سناریوی مدیریت عرضه و تقاضای خدمات اکوسیستم هیدرولوژیکی با در نظر گرفتن معیارهای مختلفی همچون تاب‌آوری و معیار اقتصادی است. همچنین، در این رساله، گروداران[3]مختلف با قدرت نسبی و جایگاه سازمانی متفاوت در نظر گرفته خواهند شد. این موضوع منجر به تشکیل یک مسئلهٔ تصمیم‌گیری سلسله‌مراتبی چندعامله-چندمعیاره می‌گردد. در این رساله، ابتدا لازم است ساختار سازمانی تصمیم‌گیرندگان تعیین شود و بر مبنای قدرت نسبی آنها، وزن هرکدام مشخص شود. در مرحلهٔ بعد، با استفاده از رویکرد بازی پیشرو-پیرو[4]گروداران در نقش پیرو، انتخاب-های مناسب خود را بر اساس سناریوهای پیشروها انجام می‌دهند. برای تعیین سناریوهای برتر هرکدام از پیروها، از نظریه استنتاج شهودی استفاده می‌شود. در گام آخر، پیشروها با استفاده از ارزیابی نتایج تصمیم-گیری پیروها، بهترین سناریوی اجرایی را انتخاب می‌کنند. با توجه به مطالب ذکر شده، استفاده هم‌زمان از مفاهیم پیشرو-پیرو و تصمیم‌گیری چندعامله-چندمعیاره در قالب نظریه استنتاج شهودی، نوآوری دیگر این رساله است. همچنین در فرایند تصمیم‌گیری سعی می‌شود برخی از عدم قطعیت‌های مهم در نظر گرفته شوند.

در رابطه با در نظرگیری عدم قطعیت، ممکن است وزن گروداران اصلی یا وزن نسبی معیارها به صورت قطعی معلوم نباشد. در این حالت، گروداران موجود در یک سطح تصمیم‌گیری، از پیامدهای گروه خود و از پیامدهای گروداران سطوح دیگر به صورت دقیق اطلاع نخواهند داشت. به‌عنوان یک نوآوری دیگر، در این رساله روشی ارائه می‌شود که به حل بازی‌هایی با اطلاعات ناکامل ناشی از وزن معیارها و گروداران می‌پردازد. در این روش فرض بر این است که بازیکنان یک سطح به‌جای اطلاع دقیق از وزن بازیکنان سطوح دیگر و

[1] Albedo coefficient
[2] Ultra Violate
[3] Stakeholders
[4] Leader-follower game