ارزیابی اندرکنش جوامع محیطی در سازگاری با کم‌آبی با استفاده از تحلیل شبکه‌های اجتماعی، مطالعه موردی: دشت اصفهان-برخوار

هامون یوسفی[۱] | آزاده احمدی[۲] ✉

۱. دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: Hamoonyosefi@ymail.com

۲. نویسنده مسئول، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: az_ahmadi@sbu.ac.ir

چکیده

در این پژوهش، برای شناسایی جوامع در دشت اصفهان-برخوار، از مرزهای سیاسی و طبیعی، نظیر مرزهای شهرستان‌ها، کانال‌های آبیاری موجود، موقعیت مکانی چاه‌های بهره‌برداری، میزان و نوع کشت کشاورزان و میزان مصرف آب در منطقه استفاده شده است. درمجموع ۱۵٦۹ ذینفع و ۱۹ جامعه در محدوده مورد مطالعه بین سال‌های ۱۳۸۹ تا ۱۳۹٤ شناسایی شده‌اند. ویژگی‌های جوامع مانند مصرف آب در واحد سطح، سود حاصل از کشاورزی در واحد سطح و شاخص‌های تحلیلی شبکه‌های اجتماعی نظیر درجه مرکزیت و بردار ویژه در محیط برنامه‌نویسی شیءگرای پایتون محاسبه شده‌اند تا ارتباط شبکه ذینفعان با وضعیت منابع آب زیرزمینی محدوده مورد مطالعه برقرار و رتبه‌بندی جوامع میسر شود. نتایج نشان می‌دهد میانگین مصرف آب کل جوامع حدود ۱٦۰۰۰ مترمکعب بر هکتار، میانگین سود در هر هکتار برابر ۱۱۰ میلیون ریال و میانگین درجه مرکزیت برابر ۰/٤۳ است. جوامعی که در نواحی جنوب غربی محدوده واقع شده‌اند، با میانگین سود ۱۹۰ میلیون ریال در هر هکتار، برترین جوامع ازنظر بهره‌وری اقتصادی هستند. همچنین، جوامع برتر با میانگین درجه مرکزیت ۰/۸ بیشترین سطح روابط ذینفعان در سطح خرد شبکه را نسبت به سایر جوامع دارند. جوامعی که کمترین بهره‌وری اقتصادی را داشتند، در مناطق شمالی و غربی دشت اصفهان-برخوار و در نزدیکی جبهه‌های ورودی آبخوان واقع شده‌اند و تغییر رویکرد این جوامع نسبت به منابع آب ضروری است. در صورت افزایش بهره‌وری در سطح کلان شبکه به‌واسطه تقویت ارتباطات میان جوامع، کاهش افت تراز آبخوان در کنار ارتقا سازگاری با کم‌آبی و سطح رفاه ذینفعان در کل محدوده مورد مطالعه متصور است.

کلیدواژه‌ها: آب‌های زیرزمینی، تحلیل شبکه‌های اجتماعی، زاینده‌رود، سازگاری.

۱. مقدمه

امروزه با رشد صنایع و افزایش جمعیت و گرایش انسان‌ها به زندگی مدرن و تغییرات اقلیمی، منابع طبیعی به‌ویژه منابع آب بیش از هر زمان دیگری در معرض فشارهای انسانی قرارگرفته است. افزایش روزافزون نیازهای آبی و محدودیت منابع آب باعث بروز مشکلات مختلفی در دستیابی به این منبع مهم و حیاتی در جوامع انسان‌ها شده است(Ohab & Ahmadi, 2018). تحلیل شبکه‌های اجتماعی برای مدل‌سازی، تجزیه‌وتحلیل ارتباطات و تعاملات میان موجودیت‌هایی نظیر افراد یا سازمان‌ها استفاده می‌شود. زیربنای تحلیل در شبکه‌های اجتماعی یک چارچوب مفهومی بر اساس نظریه ریاضی گراف‌ها است(Breiger, 2004). بر مبنای این نظریه عوامل یا بازیگران اجتماعی مرتبط باهم، خواه افراد یا سازمان‌ها، به‌عنوان گره (رأس‌های شبکه) و روابط میان آن‌ها اعم از تبادل اطلاعات یا منابع، به‌عنوان یال‌ها (پیوندهای شبکه) شناخته می‌شوند(De Nooy et al., 2018).

نگاشت شبکه ذینفعان و نهادهای حاضر در یک محدوده از کاربردهای مهم تحلیل شبکه‌های اجتماعی محسوب می‌شود. گام نخست در این راستا شناسایی ذینفعان مرتبط با جامعه مصرف‌کنندگان و نهاده‌ای مرتبط با مدیریت منابع آب است. تحلیل شبکه‌های اجتماعی می‌تواند به‌طور روشمندی نقش ذینفعان و نهادها را نگاشت و مشخص کند. برای نمونه از تحلیل شبکه‌های اجتماعی برای شناسایی و دسته‌بندی ذینفعان منابع آب در یکی از پروژه‌های مدیریت حوضه آبریز انگلستان استفاده شده است تا پویایی تأثیرگذاری ذینفعان در شبکه تعیین شود(Reed et al., 2009). یکی دیگر از کاربردهای تحلیل شبکه‌های اجتماعی نگاشت روابط میان موجودیت‌ها است. پس از تعیین و دسته‌بندی ذینفعان مرتبط با موضوع مورد مطالعه می‌توان نوع و ساختار روابط را تعیین کرد تا درنهایت ذینفعانی که به‌صورت پل ارتباطی عمل می‌کنند و یا گروه‌هایی از ذینفعان که تک‌افتاده شده‌اند و ارتباط بسیار محدودی با سایر اجزای شبکه دارند، شناسایی کرد(Crona & Bodin, 2006). پس از مشخص شدن ساختار شبکه و موقعیت کنش ذینفعان و نوع روابط آن‌ها می‌توان تأثیرگذارترین موجودیت‌ها را شناسایی کرد و با تقویت ارتباطاتی که نیاز به همکاری بیشتر دارند همسوسازی منافع را در سطح محدوده مورد مطالعه ممکن کرد. همسوسازی منافع نهادها و ذینفعان با یکدیگر می‌تواند استراتژی‌های مدیریتی را بهتر و تأثیرگذارتر نماید (Newig et al., 2010). از نتایج تحلیل شبکه‌های اجتماعی در مباحث مختلفی ازجمله کمی سازی تأثیر غیرمستقیم جوامع انسانی بر جریان آب منطقه، مدیریت مؤثرتر منابع آب، شناسایی بازیگران اصلی و پیشنهاد انجمن مصرف‌کنندگان آب، شناسایی انجمن‌های غیررسمی موجود در منطقه ،برای ضمانت اجرایی تصمیمات با رویکرد پایین به بالا مورد استفاده قرار می‌گیرد(Stein et al., 2011).

یکی از فرایندهای مهم در تحلیل شبکه‌های اجتماعی کشف ساختار خوشه‌های شبکه است که منجر به شناخت جوامع موجود و آگاهی از ساختار پنهان و پویایی جریان اطلاعات یا انتقال منابع در محدوده مورد مطالعه می‌شود. همچنین شناخت جوامع در تحلیل شبکه‌های اجتماعی می‌تواند ساختار نهادی و شبکه‌ای پنهانی را که در نگاه نخست از سطح کلان شبکه قابل شناسایی نبوده‌اند را آشکار کند (Girvan & Newman, 2002). پس از شناخت خوشه‌های شبکه و دسته‌بندی جوامع منتج از آن‌ها می‌توان به‌طور اختصاصی‌تری محدوده مورد مطالعه را هدف استراتژی‌های مدیریتی قرار داد. این موضوع منجر می‌شود که جریان اطلاعات و منابع به‌صورت بهینه‌تری در سطح شبکه منتشر شود و یا از حذف فرایند انتشار آن‌ها جلوگیری کرد و از نهایت ظرفیت شبکه

برای گسترش هرچه بیشتر بهره برد (Fortunato, 2010). برای نمونه در تحقیقی که توسط Bodin & Crona (2009) انجام یافته است از تحلیل شبکه‌های اجتماعی برای شناخت ساختار جوامع در یک شبکه مدیریت منابع طبیعی بهره بره است. با توجه به نتایج این تحقیق برخی از جوامع به‌خصوص قدرت و تأثیرگذاری بیشتری نسبت به سایر جوامع داشتند که درنهایت برای شناخت نحوه تصمیم‌گیری و تخصیص منابع بسیار مهم عنوان شده است (Bodin & Crona, 2009).

با توجه به تعداد بسیار زیاد جوامع و اعضای آن‌ها در بیشتر زمینه‌های مطالعاتی، تشخیص موقعیت و وضعیت ساختار جوامع همواره چالش بزرگی برای پژوهشگران بوده است. در سال‌های اخیر روشی نوین ابداع شده است که تشخیص جوامع را در شبکه، بر اساس اصلی‌ترین معیارهای ارزیابی کیفیت خوشه‌بندی شبکه‌ها ممکن می‌کند. این روش با نام الگوریتم نیومن[1] شناخته می‌شود. این الگوریتم بر مبنای ساختار شبکه و تعریف متغیرهای وابسته به آن نظیر بهینه‌سازی پیمانگی (ماژولاریتی[2]) جوامع عمل می‌کند و بهترین جوامع ممکن را در سطح شبکه شناسایی می‌کند (Clauset et al., 2004) . پس از معرفی این الگوریتم بسیاری از محققین سعی در بهبود و ارتقا این روش داشتند و امروزه الگوریتم‌های بسیاری با توجه به ساختار و هدف مخصوص به خود به برای تحلیل جوامع در شبکه‌های متنوع به وجود آمده است. متغیرهای اولیه مدل‌سازی نیز تأثیر بسیار زیادی در وضعیت شبکه دارند. تحلیل حساسیت شبکه نسبت به پارامترهای اولیه مدل‌سازی می‌تواند راه رسیدن به شبکه‌ای نزدیک‌تر به واقعیت را هموار کند. وضعیت مدل‌سازی شبکه‌های اجتماعی تحت تأثیر عوامل محیطی مانند فاصله یا شعاع ارتباط گره‌ها از یکدیگر می‌تواند باعث ایجاد خطا در خروجی‌های مدل شود. درنتیجه با تغییر مؤلفه‌های متأثر از محیط و تعریف آستانه‌های مطلوب در خروجی شبکه می‌توان نتایج قابل‌اتکاتری دست‌یافت (VanderWeele, 2011). درنهایت با ایجاد و بررسی نگاشتی از روابط احتمالی ذینفعان می‌توان ظرفیت سیستم را در مقابل پدیده‌هایی مانند کمبود منابع آب بررسی کرد.

پس از شناخت جوامع می‌توان از ویژگی‌های آن‌ها در راستای مدیریت منابع آب بهره برد. هر جامعه‌ای ظرفیت‌های مختلفی برای ایفای نقش در سطح شبکه دارد. از این ویژگی‌ها می‌توان در راستای مفاهیم مدیریتی نظیر انعطاف‌پذیری شبکه در مواجهه با شرایط بحرانی بهره برد. برای مثال در شبکه سازمان‌های منابع آب انگلستان انعطاف‌پذیری[3]، به‌عنوان یک مفهوم مرتبط با سازگاری، موردبررسی قرارگرفته است. در این پژوهش با استفاده از شبکه اجتماعی مشارکتی، و از طریق تجزیه‌وتحلیل و ارسال پیام درون سازمان‌ها، انعطاف‌پذیری شبکه و واکنش‌های زنجیره‌ای در مواجهه با شرایط بحرانی برآورد شده است همچنین، نتایج نشان داده است که موقعیت کنش بازیگران در جوامع مصرف‌کننده نقش مؤثری در میزان انعطاف‌پذیری و تاب‌آوری درون سامانه در مواجه با موقعیت‌های بحرانی دارد. از سنجه‌های ارزیابی وضعیت جوامع، مرکزیت درجه در شبکه به‌عنوان یک سنجه قوی برای تحلیل شبکه نام برد که می‌تواند مکان‌هایی با بیشترین تأثیرپذیری را در شبکه معرفی کند(Ward et al., 2020) . در تحلیل شبکه‌های اجتماعی سنجه‌های دیگر نظیر مرکزیت بینابینی و تراکم شبکه و بردار ویژه برای مشخص کردن تأثیر ذینفعان در سطوح خرد و کلان شبکه بکار گرفته شده‌اند. به‌عنوان‌مثال، در حوضه آبریز رودخانه وال هلند، از همین سنجه‌ها در تحلیل شبکه‌های اجتماعی ذینفعان استفاده شده است. نتایج حاصل از تحلیل سنجه‌های شبکه نشان داده است بیشترین نقش در مدیریت منابع آب این منطقه مربوط به سازمان‌های دولتی بوده ولی سازمان‌های غیردولتی نیز تأثیر زیادی در تبادل ایده‌ها و فرآیندهای تصمیم‌گیری داشته‌اند (Fliervoet et al., 2016).

سیستم‌های تخصیص و بهره‌برداری از منابع آب در کشور ایران ماهیتی دولتی دارند. جایگاه این ارگان‌های دولتی در تأمین و تحقق نیازمندی بخش‌های مختلف اجتماعی، اقتصادی و محیط‌زیستی بسیار پررنگ است. زمانی که سیاست سازمان‌ها و اقدامات آن‌ها با پتانسیل‌های منطقه و ظرفیت منابع موجود مطابقت نداشته باشد، خطر واگرایی میان ذینفعان و ایجاد تراژدی منابع مشترک، محتمل خواهد بود(Zanjanian et al., 2018) . شبکه سازمان‌های دخیل در مدیریت آب‌های زیرزمینی دارای سرمایه اجتماعی کم هستند. عموماً به دلیل ماهیت متفاوت سازمان‌ها، منافع هم سو نیستند و این امر مانع همکاری مؤثر و ایجاد سرمایه اجتماعی بالا می‌شود. بدون سرمایه اجتماعی، سطح اعتماد، تبادل اطلاعات میان ذینفعان کاهش میابد و سازمان‌ها در مدیریت ناکارآمد می‌شوند(Rahimi-Feyzabad et al., 2022) . بنابراین برای ارتقا سازگاری با کم‌آبی، ذینفعان یک حوضه می‌توانند با ایجاد جوامع محلی، خود برای مواجهه با شرایط بحرانی آماده شوند و از تجربیات یکدیگر بهره ببرند. در حوضه زاینده‌رود توسعه صنایع و درنتیجه جذب مهاجر، موجب افزایش جمعیت بیش از نرخ رشد جمعیت کشور شده است. با افزایش تعداد افراد، نیاز به مصارف شرب و بهداشت نیز افزایش یافته است. خشک شدن رودخانه زاینده‌رود و به خطر افتادن اکوسیستم آن درنتیجه پیشرفت صنایعی است که هم مصرف آب بالایی دارند و هم ازنظر کیفی پساب زیادی به حوضه آبریز تزریق می‌کنند همچنین کشت محصولات کشاورزی با نیاز آبی بسیار زیاد، همگی بر اکوسیستم این منطقه و تالاب گاوخونی تأثیر کاهنده و بدی دارند. با توجه به مسائل مطرح‌شده و اهمیت سیاسی و اقتصادی و تاریخی این منطقه حفظ و ارتقا ظرفیت سازگاری این حوضه برای امروز و آینده با همکاری و مشارکت ذینفعان ضروری است(Golkarami & Kaviani Rad, 2017) . در پژوهش حاضر شبکه‌های موجود در دشت اصفهان–برخوار مورد بررسی قرار می‌گیرند. در این بررسی، برای اولین بار شبکه‌های اجتماعی ذینفعان در محدوده مورد مطالعه با استفاده از موقعیت مکانی چاه‌های مورد بهره‌برداری ذینفعان نگاشت و تحلیل می‌شود. در این مقاله با استفاده از روش‌های خوشه‌بندی شبکه، ساختار جامعه‌های پنهان مصرف‌کنندگان شناسایی و تحلیل می‌شوند که هدف اصلی پژوهش را شکل می‌دهد. همچنین با استفاده از داده‌های موجود از منطقه شامل میزان تخلیه از چاه‌ها و میزان سود کشاورزان، تأثیرگذارترین و موفق‌ترین جامعه‌ها شناسایی می‌شوند که از دیگر اهداف اصلی پژوهش حاضر است. از اهداف فرعی پژوهش می‌توان به بررسی وضعیت آب‌های زیرزمینی در چاه‌های مشاهداتی در طی گام‌های زمانی پنج‌ساله پژوهش اشاره کرد و با توجه به موقعیت مکانی چاه‌های مشاهداتی و موقعیت مکانی جوامع شناسایی‌شده و همچنین مرزهای ورودی و خروجی آبخوان و نزدیکی جوامع به آن‌ها میزان اهمیت عملکرد جوامع سنجیده می‌شود. تأثیرگذارترین و موفق‌ترین جامعه‌ها می‌توانند به‌عنوان الگویی برای سایر جوامع در سطح کلان معرفی شوند تا میزان سازگاری با کم‌آبی در تمام شبکه ارتقا یابد. این رویکرد با توجه به سرمایه اجتماعی اندک سازمان‌های مسئول در حفاظت از منابع آب می‌تواند ذینفعان منابع آب منطقه دشت اصفهان–برخوار را در برابر چالش‌های آینده تقویت کند.

۲. مواد و روش‌ها

۲. ۱. منطقه موردمطالعه

محدوده مطالعاتی اصفهان_برخوار یکی از محدوده‌های مطالعاتی حوضه آبریز گاوخونی با وسعت ۳۷۷۵/٦ کیلومترمربع است که ۲٤۰۸/٤ کیلومترمربع از این محدوده را دشت و ۱۳٦۷/۲ کیلومترمربع را ارتفاعات تشکیل می‌دهند. حدود ارتفاعی محدوده از ۱۵۹۸ متر در بخش جنوبی حوضه در مجاور دشت کوهپایه_سگزی تا حداکثر ارتفاع ۲٦٤۱ متر از سطح دریا، در بخش‌های شمالی محدوده است. در شکل (۱) موقعیت جغرافیایی آبخوان اصفهان-برخوار و مراکز شهری موجود در این محدوده نمایش داده شده است. به دلیل نیاز بالای مصرف شرب در این محدوده، بیشترین میزان آب انتقالی در حوضه گاوخونی به محدوده اصفهان_برخوار صورت می‌گیرد. از دیگر طرح‌های عمرانی_آبی مهم در محدوده می‌توان به سد آبشار، کانال انتقال آب برخوار و خطوط انتقال آب اشاره کرد. جریان آب سطحی اصلی در این محدوده رودخانه زاینده‌رود است که از بخش غربی محدوده عبور می‌کند. ضمن اینکه، با وجود دو تصفیه‌خانه آب شرب در این دشت، بخشی از پساب مصرف شرب محدوده تصفیه می‌شود و بخشی به مصرف کشاورزی محدوده رسیده و بخشی وارد محدوده کوهپایه_سگزی می‌شود. در محدوده آبخوان اصفهان_برخوار به جهت پایش کمی و کیفی آبخوان، تعداد ۳۵ حلقه چاه مشاهداتی تعبیه شده است. ضمن اینکه برای استخراج خصوصیات هیدرودینامیکی آبخوان و انجام مطالعات زیرسطحی، ۱۲ حلقه چاه اکتشافی در محدوده مطالعاتی استفاده شده است. بر اساس هیدروگراف معرف آبخوان اصفهان_برخوار باوجود نوسانات فصلی در هیدروگراف، افت دائمی سطح آب زیرزمینی مشاهده می‌گردد؛ این در حالی است که از سال ۱۳۸۷ به بعد به دلیل عدم آبدهی و یا کاهش آبدهی رودخانه زاینده‌رود در مقایسه با سال‌های پیشین، با تغذیه کمتر آبخوان سطح بالاآمدگی آب در فصول تر نیز کاهش یافته است. شکل (۲) مرزهای ورودی و خروجی و خطوط هم‌تراز آب زیرزمینی را در محدوده مورد مطالعه نمایش می‌دهد (Ostad-Ali-Askari et al., 2019). بررسی عملکرد ذینفعان نزدیک به موقعیت مرز جبهه‌های ورودی و خروجی آبخوان می‌تواند در برآورد وضعیت آبخوان اثرگذار باشد.

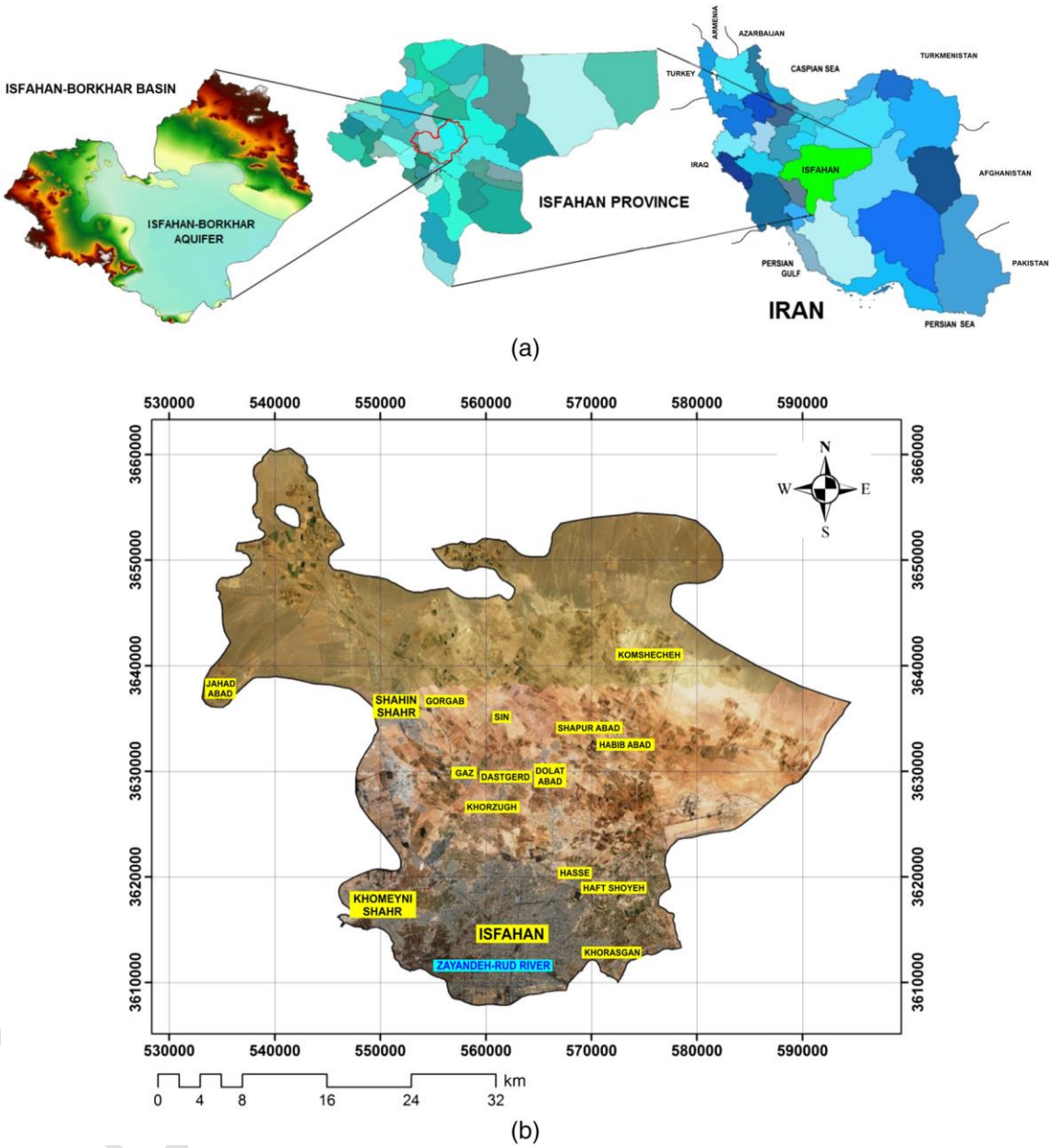

Figure 1. (a) Geographical location and (b) Satellite image of the Isfahan–Borkhar aquifer domain (yellow boxes are labelled as cities; coordinates are as UTM-WGS1984 zone 39 N).

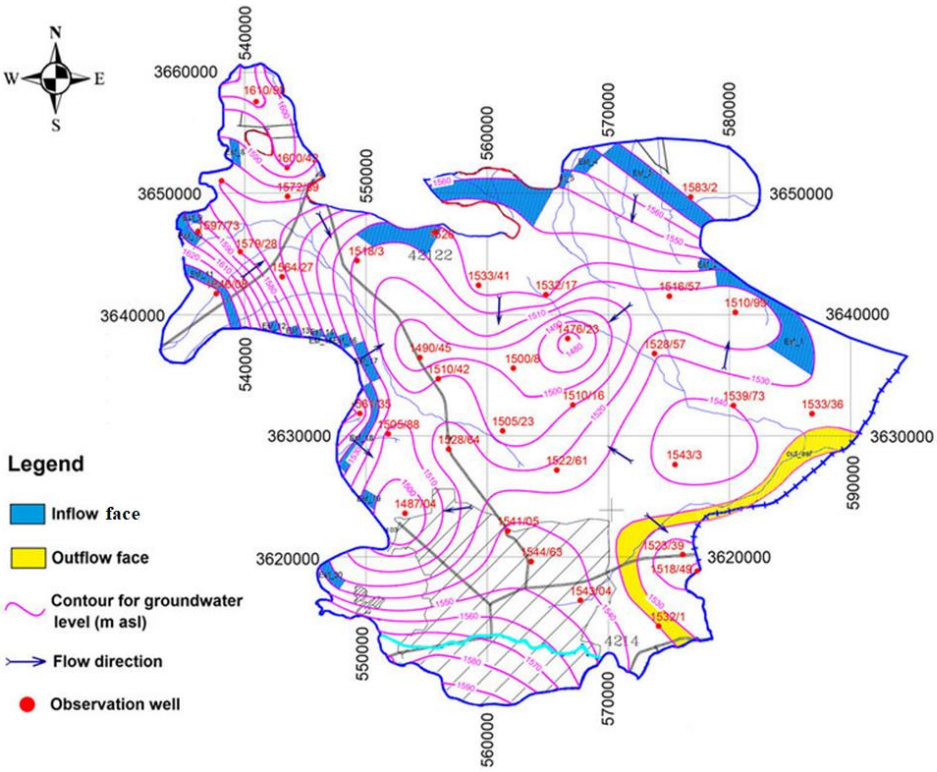

Figure 2. Groundwater potentiometric map of the Isfahan–Borkhar aquifer.

۲. ۲. داده‌ها و فرایند تحقیق

در این پژوهش داده‌های جمع‌آوری‌شده عبارت‌اند از موقعیت جغرافیایی چاه‌های بهره‌برداری و میزان تخلیه هر چاه و نوع کشت و هزینه کشت و درآمد محصولات مختلف کشت‌شده در دشت اصفهان–برخوار. داده‌های مربوط به چاه‌های مشاهداتی در بازه سال‌های ۱۳۸۹ تا ۱۳۹٤ جمع‌آوری‌شده است. الگوریتم بررسی شبکه‌های اجتماعی و جوامع ذینفعان در شکل(۳) نمایش داده شده است.

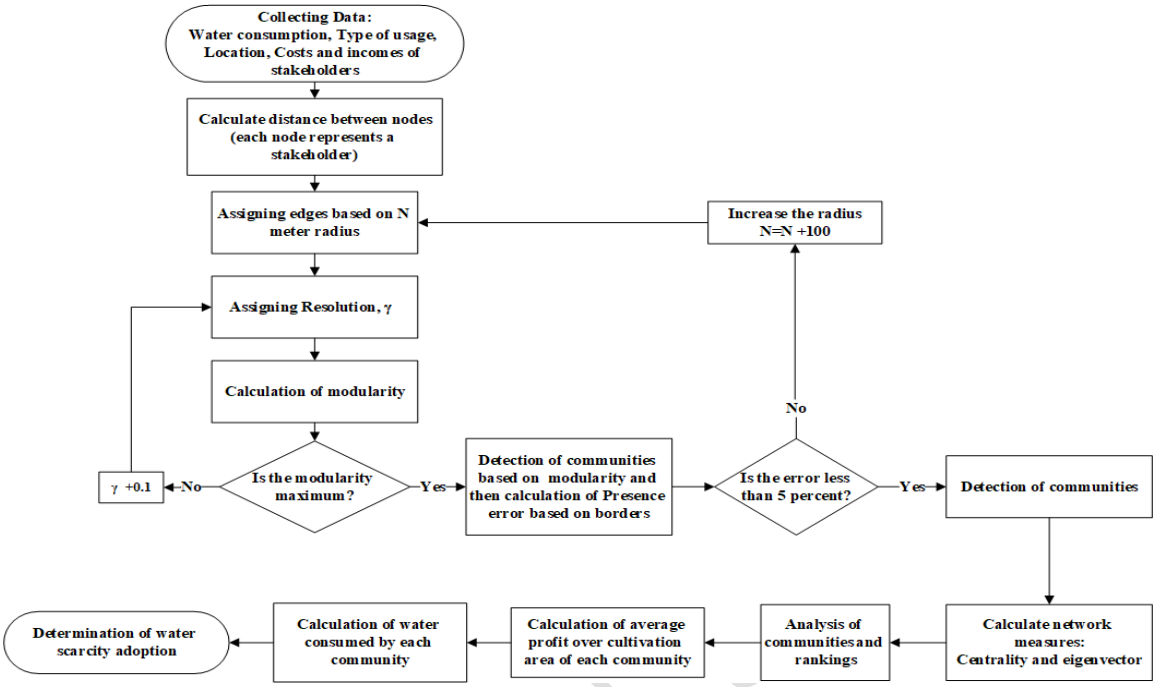

Figure 3. Flowchart of the research

۲. ۳. مدل‌سازی و تحلیل شبکه‌های اجتماعی

در این پژوهش با استفاده از داده‌های مکانی چاه‌های بهره‌برداری دشت اصفهان–برخوار شبکه‌های اجتماعی و جوامع ذینفعان مورد تحلیل قرار می‌گیرند. به‌طوری‌که هر گره در شبکه نماینده یک ذینفع است. هر گره دارای ویژگی‌هایی نظیر میزان مصرف و نوع کشت سالانه است و یال‌های شبکه به‌عنوان نمایانگر وجود ارتباط میان گره‌ها، مسیر انتقال اطلاعات را در شبکه فراهم می‌کنند. در این پژوهش با استفاده از ویژگی‌های اختصاص‌یافته به هر گره و نوع کاربری چاه‌ها، شرط ایجاد شبکه شکل می‌گیرد. سپس با استفاده از پارامترهایی نظیر ماژولاریتی شبکه، تشخیص جوامع متفاوت محقق می‌شود. درنهایت با توجه به مرزهای جغرافیایی پارامترهای نهایی آن واسنجی و صحت سنجی می‌شوند. برای دست‌یابی به ساختارهای کوچک‌تر در شبکه‌های بزرگ یکی از سنجه‌های مهم تحلیلی، میزان تفکیک‌پذیری[۴] است. بنا به تعریف هرچقدر تمایل به رخدادی درون یک زیرگروه بیشتر باشد، درجه تفکیک‌پذیری بیشتر خواهد بود. روشی ابتکاری بانام الگوریتم لوون[۵] برای استخراج ساختار اجتماعی از شبکه‌های بزرگ پیشنهاد می‌شود (Blondel et al., 2008). این الگوریتم بر اساس روش نیومن توسعه داده شده است. به این معنی که بر پایه بهینه‌سازی ماژولار شبکه عمل می‌کند. این روش نشان داده که نسبت به سایر روش‌های تشخیص خوشه‌ها در شبکه درحالی‌که سریع‌تر است، اما به همان اندازه خوب عمل می‌کند. بنابراین برای تشخیص خوشه‌ها در شبکه‌های بسیار بزرگ که محاسبات بسیار زمان‌بر است مناسب است. این الگوریتم به دو بخش متفاوت تقسیم می‌شود که به‌صورت تکرارشونده اجرا می‌شوند. در بخش اول با تصور اینکه شبکه N گره دارد ابتدا به هر گره، یک جامعه منحصربه‌فرد اختصاص می‌دهد سپس برای هر گره i همسایگی رأس j را در نظر می‌گیرد و کیفیت ماژولار بودن جامعه را در صورت حذف گره i می‌سنجد، درصورتی‌که شاخص ماژولار در اثر این تغییر عدد

بیشتری را نشان داد حذف‌شدگی گره i تثبیت می‌شود. در غیر این صورت به جامعه قبلی بازمی‌گردد. در بخش دوم بر ساختن شبکه‌ای که گره‌های آن اکنون در بخش اول دسته‌بندی‌شده‌اند و جوامع را تشکیل داده‌اند، تأکید دارد. برای دستیابی به این منظور و محاسبه ماژولار بودن جوامع وزن یال‌های بین گره‌های جدید به تفکیک دو اجتماع مرتبط، با وزن مجموع یال‌های بین دو اجتماع مربوطه محاسبه می‌شود. زمانی که این مرحله کامل شد برای به دست آوردن ماژولاریتی بالاتر ممکن است بخش اول دوباره اجرا شود. شاخص ماژولار یک جامعه، تابع هدفی است که کیفیت جامعه تشکیل‌شده را نشان می‌دهد و با بهینه‌سازی آن بهترین جامعه‌های ممکن در شبکه‌های بزرگ شناسایی می‌شوند. تابع شاخص ماژولار به شکل زیر محاسبه می‌شود(Blondel et al., 2008):

رابطه ۱) $$Q = \frac{1}{2m}\sum_{i.j}\left[A_{i.j} - \frac{k_i k_j}{2m}\right]\delta(c_i.c_j)$$

در رابطه (۱)، $A_{i.j}$ نشان‌دهنده وزن یال‌های میان i و j است، عبارت $k_i = \sum_j A_{i.j}$ حاصل جمع وزن یال‌ها در رأس i ، c_i جامعه‌ای است که رأس به آن اختصاص‌یافته، عبارت δ برابر است با تابع $\delta(u.v)$ که اگر $u = v$ حاصل ۱ است و در غیر این صورت صفر است، همچنین m برابر است با $\frac{1}{2}\sum A_{i.j}$. حاصل این رابطه ریاضی عددی مابین صفر و یک است. تغییرات شاخص ماژولار در اثر انتقال گره i به جامعه جدید C توسط رابطه (۲) نشان داده شده است:

رابطه ۲) $$\Delta Q = \frac{k_{i.in}}{2m} - \gamma\frac{\sum_{tot} k_i}{2m^2}$$

در رابطه فوق، m اندازه گراف، $k_{i.in}$ برابر با جمع وزن یال‌ها از گره i به گره‌های جامعه جدید C است. k_i وزن یال‌های گره i، و $\sum_{tot} k_i$ مجموع وزن یال‌های گره‌های i است و γ برابر با پارامتر تفکیک‌پذیری . پس از تشکیل جامعه توسط الگوریتم، می‌توان هر جامعه را توسط سنجه‌های شبکه اجتماعی تحلیل کرد. شاخص‌های کمی شبکه می‌توانند با تمرکز بر نحوه قرارگیری و موقعیت گره‌ها و ارتباطشان با سایر گره‌ها، قدرت، مرکزیت و نقش ذینفعان را چه در سطح کلان شبکه چه در سطح جامعه‌های تشکیل یافته در زیر شبکه‌ها، تعیین کنند (Berkes et al., 2008) . سنجه‌هایی نظیر مرکزیت درجه و بردار ویژه در تحلیل شبکه‌های اجتماعی کاربرد زیادی دارند. مرکزیت درجه امتیاز بسیار مهمی است که بر اساس صرفاً تعداد یال‌هایی که به هر گره اختصاص‌یافته سنجیده می‌شود. با شمارش بیشترین تعداد ارتباطی که هر گره با گره‌های موجود در شبکه دارد می‌توان تشخیص داد کدام گره در شبکه احتمالاً بیشترین اطلاعات را دارد و یا با سرعت بیشتری می‌تواند با سایر گره‌ها مرتبط شود. معمولاً کنشگران در شبکه‌های اجتماعی با درجه مرکزیت بالا نقش کانال‌های اصلی تبادل اطلاعات را در ساختار شبکه می‌توانند ایفا کنند. توزیع درجه‌ای گره از قانون توزیع قدرت پیروی می‌کند به این معنی که تعداد اندکی از گره‌ها تعداد بسیار زیادی از روابط را دارا هستند. طبق رابطه ریاضی (۳) اگر یالی بین گره i و j وجود داشته باشد، مقدار m_{ij} آن برابر یک و در غیر این صورت معادل صفر خواهد بود.

رابطه ۳) $$d(i) = \sum_j m_{ij}$$

مرکزیت بردار ویژه همانند مرکزیت درجه سنجه‌ای است که بر اساس تعداد یال‌هایی که از یک گره به سایر گره‌ها وجود دارد سنجیده می‌شود. سپس در گامی فراتر از آن کیفیت اتصال آن گره را در سطح کلان شبکه تحلیل می‌کند. به این معنی که یک گره نه‌فقط در همسایگی خود بلکه در تمام شبکه تأثیرگذار است. در رابطه (٤) عبارت λ برابر با مقدار ویژه به معنی بیشینه ماژولاری

مثبت است. بردار ویژه x به‌واسطه فرمول متناظر تا یک ضریب ثابتی محاسبه می‌شود. عبارت A ماتریس مجاورت گراف است. به‌واسطه قانون ضرب ماتریس رابطه(٤) به رابطه(٥) تبدیل می‌شود. در این رابطه بردار ویژه i با مقدار ویژه λ ضرب می‌شود و با مقادیر قبلی جمع می‌شود(Bonacich, 1972) .

$$\lambda x^T = x^T A$$ رابطه ٤)

$$\lambda x_i = \sum_{j \to i} x_i$$ رابطه ٥)

۲. ٤. تحلیل حساسیت

برای بررسی واکنش خروجی‌های مدل شبکه‌های اجتماعی نسبت به دو متغیر اصلی شبکه (تفکیک‌پذیری و ماژولاریتی)، تحلیل حساسیت بر مبنای درصد خطای حضور جوامع در مرزهای سیاسی و جغرافیایی سه شهرستان برخوار و خمینی‌شهر و اصفهان انجام می‌پذیرد. به این منظور پس از شناسایی جوامع توسط الگوریتم لوون درصورتی‌که ۵۱ درصد از اعضای جامعه درون مرزهای یکی از سه شهرستان قرار می‌گرفت به همان شهرستان تعلق میافت. سپس درصد خطای حضور جامعه بر مبنای میزان حضور یا عدم حضور اعضای جامعه در مرزهای سیاسی سنجیده می‌شود. در صورتی خطای حضور اعضا بیش از پنج درصد باشد مقادیر تفکیک‌پذیری و شعاع ارتباط ذینفعان تغییر می‌کند تا درنهایت به میزان خطای کمتر از پنج درصد دست یابد. حاصل تلاقی نمودارهای خطای سه شهرستان و نمودار بهینه‌سازی شاخص ماژولاریتی، بهترین درجه تفکیک‌پذیری برای شبکه را تولید می‌کند. سپس با استفاده از مقادیر تثبیت‌شده شبکه نهایی دشت اصفهان–برخوار ترسیم می‌شود و جوامع آن شناسایی می‌شوند. رابطه (٦) نمای ریاضی محاسبه خطای مرزی جامعه‌ها است. در این رابطه γ_j میزان تفکیک‌پذیری شبکه، E_i خطای جامعه، $Node_in_i$ تعداد گره‌های درون‌مرزی، $Node_out_i$ تعداد گره‌های برون‌مرزی.

$$\begin{cases} 0 < \gamma_j < 10 \\ E_i = C_i(\gamma_j) = \frac{Node_in_i}{Node_out_i} \times 100 \end{cases}$$ رابطه ٦)

۳. نتایج و بحث

۳. ۱. وضعیت آب‌های زیرزمینی

با استفاده از داده‌های موجود از منطقه موردمطالعه می‌توان وضعیت آبخوان را در انتهای سال ۱۳۹٤ با ابتدای سال ۱۳۸۹ مقایسه کرد. در جدول(۱) میانگین تراز در چاه‌های مشاهداتی نمایش داده شده است و نتایج نشان می‌دهد به‌طور میانگین سطح تراز در کل آبخوان ۲/٦ متر کاهش داشته است.

Table 1. Average level of water at observational wells in Esfahan-Borkhar aquifer

Year	Average level of water (m)
2010	1538.6
2015	1536

هرچند به‌طورکلی تراز آبخوان کاهش یافته است اما در برخی نواحی (مانند چاه‌های مشاهداتی شش و ۱۸ و ۳۳ و ۳٤) تراز نسبتاً ثابت مانده و حتی در برخی از موارد (مانند چاه‌های مشاهداتی شماره دو و چهار) تراز آبخوان افزایش پیدا کرده است (شکل ٤). احتمالاً ذینفعانی که در محدوده این چاه‌های مشاهداتی وجود دارند گزینه‌های خوبی برای بررسی سطح قابل‌قبول سازگاری با کم‌آبی باشند. از طرفی با بررسی این مناطق می‌توان علل احتمالی سازگاری با کم‌آبی را شناسایی کرد. درنهایت با آموزش و آگاه‌سازی دیگر جوامع ذینفعان می‌توان سطح سازگاری با کم‌آبی را ارتقا داد. چراکه کاهش سطح تراز میانگین دشت اصفهان-برخوار و ادامه روند موجود می‌تواند باعث بروز پدیده‌های مخربی مانند فرونشست و از بین رفتن الگوی اقتصادی-اجتماعی دشت اصفهان-برخوار شود.

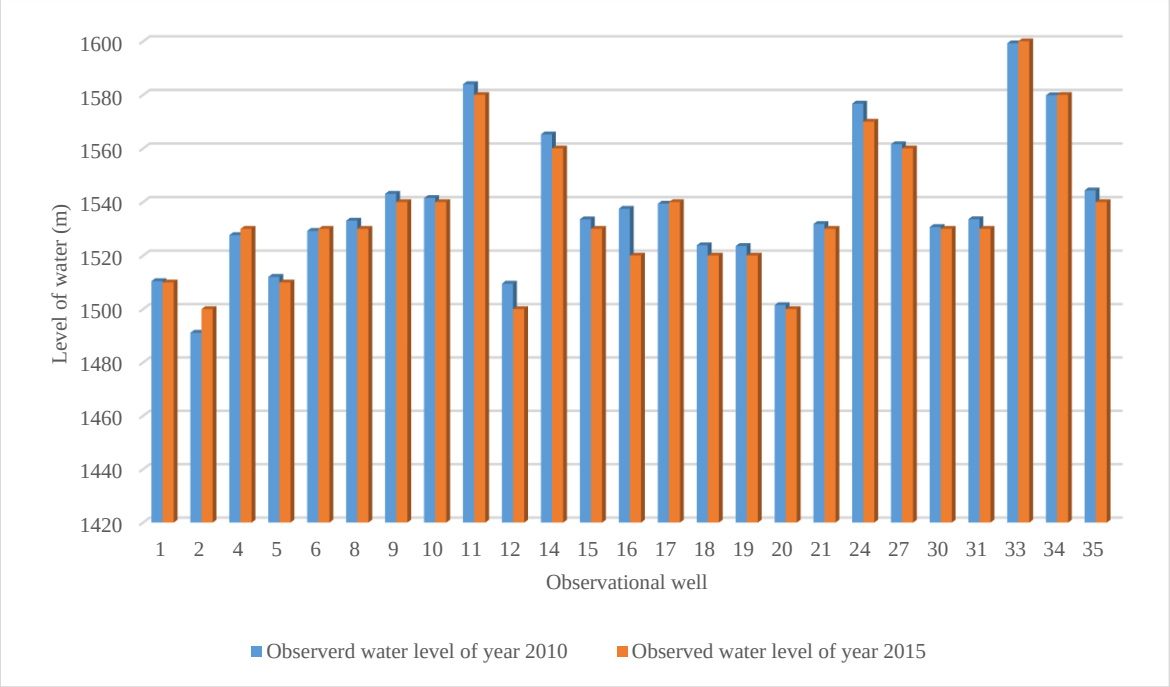

Figure 4. Water levels in observation wells at the first and fifth-year time steps

۳. ۲. تحلیل شبکه‌های اجتماعی موجود در منطقه

با توجه به الگوریتم پژوهش ارائه شده در بخش فرایند تحقیق، تحلیل حساسیت در پژوهش حاضر علاوه بر تثبیت متغیر مهم تفکیک‌پذیری بر اساس بهترین ماژولاریتی (پارامترهای موردنیاز تشکیل شبکه) میزان صحت جوامع شناسایی‌شده را با توجه به مرزهای سیاسی استان، دز سطح شبکه، می‌سنجد. بنابراین پیش از ورود به مرحله تحلیل شبکه، اطمینان از صحت وضعیت شبکه بررسی می‌شود. در فرایند تحلیل حساسیت ٤۵۰۰ شبکه متفاوت در سطح آبخوان تحت تأثیر تغییر مؤلفه تفکیک‌پذیری و شعاع ارتباطی ذینفعان ایجاد می‌شود. در این فرایند شعاع ارتباطی ذینفعان از ۵۰۰ متر آغاز و با گام‌های ۱۰۰ متر تا ۵۰۰۰ متر اضافه

می‌شود. شعاع ارتباطی تعیین کننده وجود ارتباط میان ذینفعان است. درصورتی‌که موقعیت مکانی ذینفع در فاصله شعاع ارتباطی ذینفع دیگری باشد، با آن ذینفع مرتبط می‌شود و یال میان دو گره برقرار می‌شود. در هر گام از تخصیص شعاع ارتباطی به گره‌های شبکه درجه تفکیک‌پذیری از عدد ۰/۱ تا ۱۰ با گام ۰/۱ تغییر می‌کند. در هر یک از این ٤٥۰۰ شبکه ایجادشده سه مؤلفه درجه تفکیک‌پذیری و درصد موفقیت موقعیت جوامع و ماژولاریتی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در شکل (۵) بهترین خروجی مدل‌سازی در رابطه با تحلیل حساسیت ارائه شده است. محور درجه تفکیک‌پذیری (Resolution) به‌عنوان متغیر ورودی در تحلیل حساسیت عمل می‌کند. درجه تفکیک‌پذیری تعیین‌کننده میزان تراکم جوامع در سطح کلان شبکه است. به این معنی که هرچه درجه تفکیک‌پذیری بیشتر از عدد یک باشد، تمایل شبکه برای ایجاد جوامع کوچک‌تر بیشتر است. همچنین هرچه تفکیک‌پذیری کوچک‌تر از عدد یک باشد، نشان‌دهنده تمایل شبکه به ایجاد جوامع با تعداد عضویت بیشتر است. تغییرات درجه تفکیک‌پذیری دو خروجی تحلیل حساسیت، با عنوان‌های درصد موفقیت موقعیت مرزی جوامع (Percentage of Success) و پیمانگی (Modularity)، را تحت تأثیر قرار می‌دهد. برای محاسبه درصد موفقیت موقعیت جوامع، در صوتی که جامعه تفکیک‌شده از ساختار کل شبکه با تعداد عضویت بیش از ۵۰ درصد، در محدوده عارضه یکی از سه شهرستان محدوده واقع شده باشد به آن شهرستان تعلق می‌گیرد و درصد گره‌هایی که خارج از محدوده شهرستان واقع شده‌اند، به‌عنوان خطای تشخیص جامعه معرفی می‌شوند. درنهایت میانگین خطای تشخیص جامعه برای هر شهرستان به‌صورت جداگانه حساب می‌شود. خروجی این فرایند برای هر سه شهرستان اصفهان و برخوار و خمینی‌شهر به‌صورت جداگانه در شکل (۵) نمایش داده شده است. از طرفی مهم‌ترین شاخص کیفی ساختار جوامع شناسایی شده به‌عنوان پیمانگی (یا همان ماژولاریتی شبکه)، در اثر تغییر درجه تفکیک‌پذیری در بازه صفر تا یک تغییر می‌کند. هرچه مقدار عددی ماژولاریتی به عدد یک نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده کیفیت بیشتر ساختار ارتباطات در شبکه است. با توجه به موارد عنوان‌شده، دو مؤلفه درصد بالای موفقیت موقعیت جوامع و ماژولاریتی شبکه، هیچ‌یک به‌تنهایی برای شناسایی جوامع منطقه کافی نیستند. برای مثال با عدد درجه تفکیک‌پذیری یک، می‌توان بیشترین حد ماژولاریتی یعنی عدد ۰/٦۸ را به دست آورد ولی میزان درصد موفقیت حضور جوامع در شهرستان خمینی‌شهر صفر درصد و اصفهان حدود ۸۵ درصد و برخوار ۹۵ درصد است که مقادیر قابل قبولی نیستند. بنابراین با افزایش درجه تفکیک‌پذیری به عدد ۲/٤ درحالی‌که ماژولاریتی با عدد ۰/٦۱ همچنان در ردیف کیفیت‌های بسیار خوب قرار می‌گیرد. این مقدار از ماژولاریتی در سایر پژوهش‌ها به‌عنوان ماژولاریتی با کیفیت بسیار خوب عنوان شده است(Yao et al., 2023) . همچنین درصد موفقیت حضور جوامع در هر سه شهرستان به حدود ۹۵ درصد افزایش می‌یابد. محل برخورد نمودارهای درصد خطای جوامع (خطوط با رنگ‌های سبز و زرد و قرمز) که هر یک معرف یک شهرستان هستند، و ماژولاریتی شبکه (خط‌چین مشکی)، بهینه‌ترین درجه تفکیک‌پذیری برای هر شعاع ارتباطی مشخص می‌شود. اکنون می‌توان با مقایسه مقادیر متفاوت ماژولاریتی حاصل از مقدار بهینه درجه تفکیک‌پذیری برای هر شعاع ارتباطی (٤۵ شعاع متفاوت) و میانگین درصد موفقیت موقعیت جوامع، بهترین شعاع ارتباطی را برای محدوده مورد مطالعه مشخص کرد. بنابراین درجه تفکیک‌پذیری ۲/٤ ماژولاریتی با عدد ۰/٦۱ با میانگین ۹۵ درصد موفقیت حضور جوامع در شعاع ۳۰۰۰ متر بهترین شعاع ارتباطی و درجه تفکیک‌پذیری با بهینه‌ترین ماژولاریتی حاصل شده است. علت انتخاب حدود بیشتر از ۵۰۰ متر و کمتر از ۵۰۰۰ متر به خروجی نمودار تحلیل حساسیتی که مورد بررسی قرار گرفت برمی‌گردد. چراکه در شعاع ارتباطی

بیش از ۵۰۰۰ متر و کمتر از ۵۰۰ متر شبکه به حالت تعادلی می‌رسد که تغییر میزان درجه تفکیک‌پذیری تغییر چندانی در ساختار آن ایجاد نمی‌کند و نمودارهای درصد موفقیت حضور جوامع و ماژولاریتی هیچ‌گاه یکدیگر را قطع نمی‌کنند و مقادیر ماژولاریتی همواره کم (حدود ۰/۳) است.

در شکل(٦) خروجی مدل‌سازی شبکه‌های اجتماعی به همراه اجتماعات محلی شناسایی‌شده توسط ورودی‌های موقعیت مکانی چاه‌های بهره‌برداری و شعاع ارتباطی ۳۰۰۰ متر و درجه تفکیک‌پذیری ۲/٤ نمایش داده شده است. در این شکل شماره هر جامعه و موقعیت مکانی چاه‌های مشاهداتی مشخص شده است. همچنین محدوده شهرستان‌ها در آبخوان به تفکیک مرزهای هر استان نشان داده شده است. درمجموع ۱۹جامعه محلی و ۱۵٦۹ چاه بهره‌برداری در این محدوده شناسایی شده است و بنا بر خروجی مدل‌سازی می‌توان ۱۵٦۹ چاه بهره‌برداری را میان ۱۹ جامعه شناسایی شده در محدوده آبخوان تقسیم کرد. علاوه بر جوامع شناسایی شده با توجه به اینکه هر گره دارای ویژگی‌هایی نظیر میزان سود کشاورزی و میزان مصرف آب و سطح زیر کشت است در ادامه رتبه‌بندی این جوامع با تجمیع نسبت ویژگی‌های تمام گره‌های عضو، نظیر سود در واحد هکتار و مصرف در واحد هکتار هر جامعه، میسر خواهد بود. پیش از این در تحقیقاتی که انجام شده است، صرفاً بر شناسایی خوشه‌ها در سطح محلی شبکه بسنده شده است اما در تحقیق حاضر جوامع محیطی ذینفعان در منطقه مورد مطالعه شناسایی و رتبه‌بندی می‌شوند، همچنین با توجه به تغییرات وضعیت آبخوان در دوره مدل‌سازی سطح سازگاری با کم‌آبی جوامع بررسی می‌شود (Stein et al., 2011) . مقدار عدد درجه تفکیک‌پذیری ۲/٤ نشان می‌دهد احتمالاً در دشت اصفهان–برخوار ترجیح ذینفعان بیشتر بر ایجاد جوامع کوچک‌تر متمایل است تا جوامع بزرگ‌تر. کیفیت جوامع بر اساس نظر کارشناسان و مرزبندی‌های استانی با خطای جزئی پنج درصد قابل‌قبول برآورد شده است. همچنین با توجه به موقعیت مکانی کانال‌های شبکه آبیاری و زهکشی مزید بر مرزبندی‌های دهستان‌ها برای صحت سنجی شبکه مورداستفاده قرار می‌گیرد. در این شبکه ارتباطات میان ذینفعان دوطرفه بوده و بنابراین گراف شبکه اجتماعی آن‌ها گراف بدون جهت است و درجه مرکزیت به انواع ورودی و خروجی تقسیم نخواهد شد.

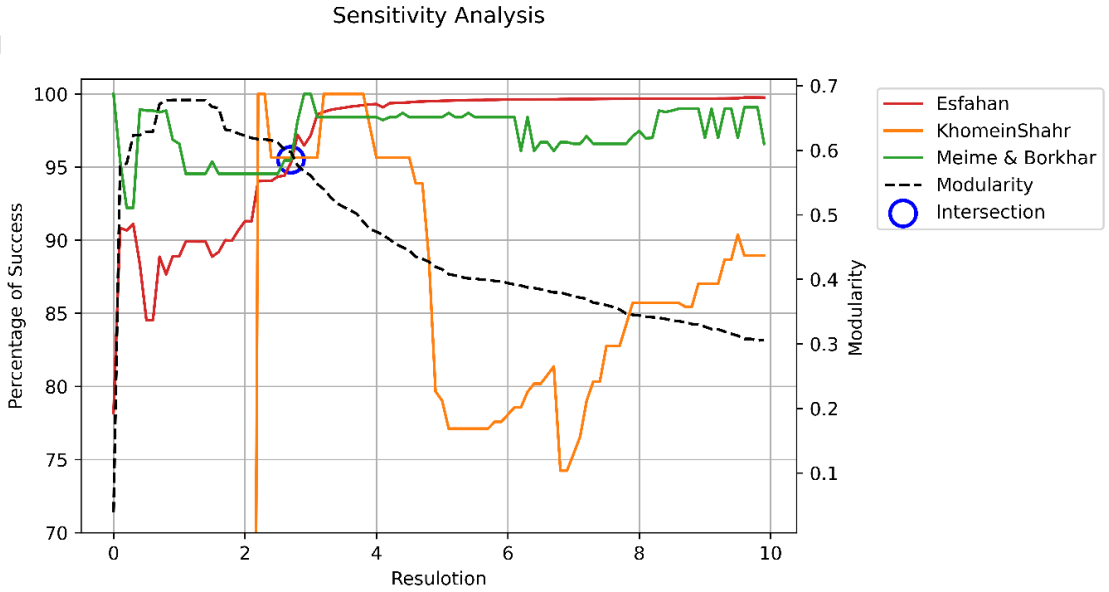

Figure 5. Sensitivity analysis of detected communities based on Percentage of success and Resolution and Modularity

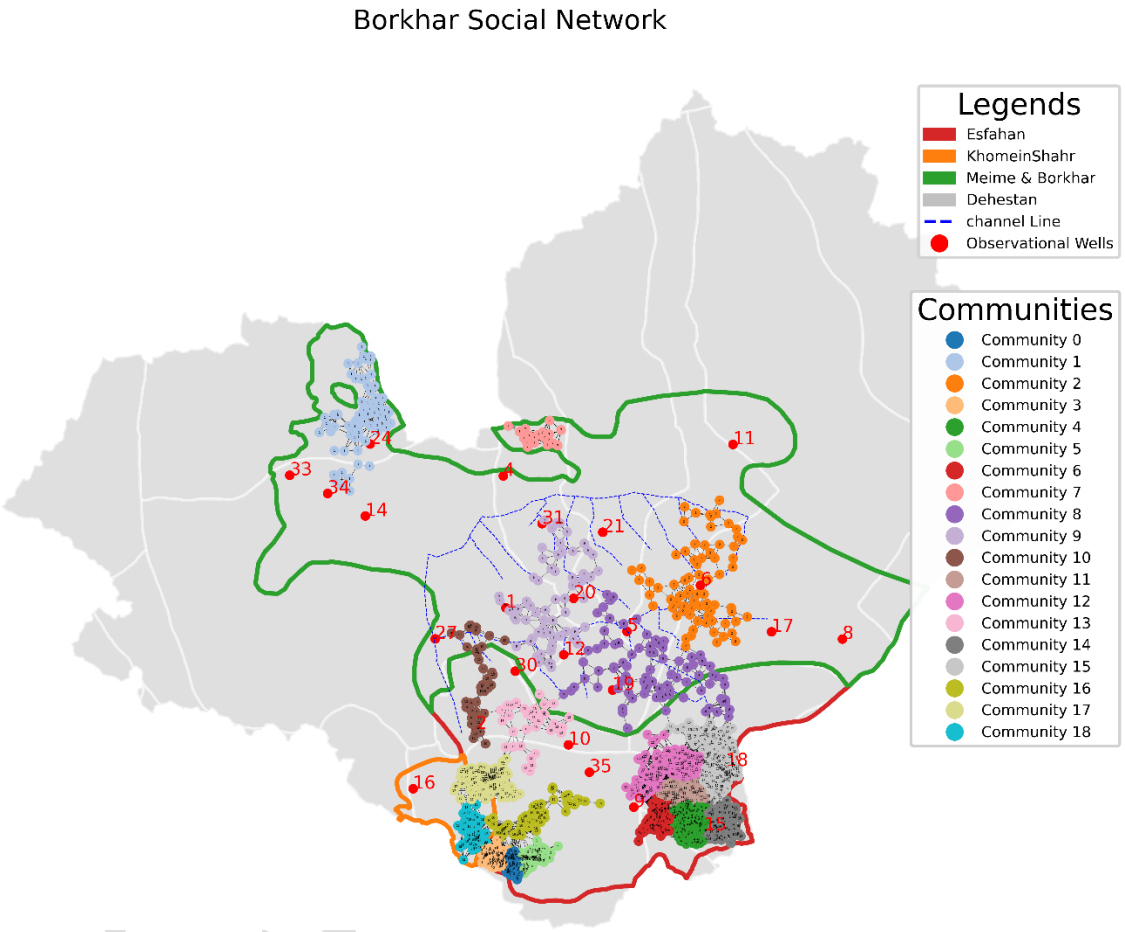

Figure 6. Social network graph and communities in the Isfahan-Borkhar plain region.

۳. ۳. مشخصات شبکه‌های اجتماعی

در جدول(۲) تعداد اعضای هر جامعه ، مصرف آب در جامعه، مجموع مساحت زیر کشت جامعه، نسبت سود کشاورز بر مساحت زیر کشت و میانگین مرکزیت درجه و همچنین میانگین بردار ویژه هر جامعه محاسبه شده است. پرجمعیت‌ترین جامعه ۱۵۷ عضو دارد و میانگین عضویت کمتر از ۸۳ نفر است. درنتیجه تمایل ذینفعان برای ایجاد جوامع پرجمعیت پایین است. این پدیده فرهنگی و اجتماعی، که متأثر از جغرافیای محدوده است، می‌تواند هم‌زمان برای تصمیم گیران حوضه منابع آب منطقه فرصت‌آفرین و چالش‌برانگیز باشد. از نگاه جامع مدیریتی شبکه‌های کوچک را بهتر می‌توان مدیریت کرد. از طرفی ایجاد ارتباط و همکاری میان جوامع کوچک و پراکنده مشکل است. درواقع تصمیم‌گیری درست و نادرست در سطح مدیریتی منطقه حساسیت زیادی دارد. مصرف آب درمجموع به‌صورت سالانه حدود ۳۰۱ میلیون مترمکعب برآورد شده است. میان نتایج مصرف آب و تعداد اعضای

جوامع همبستگی وجود ندارد و این امر می‌تواند نشان‌دهنده رفتار متفاوت جوامع در مصرف آب باشد. درمجموع حدود ۱۸۶۰۰ هکتار از اراضی منطقه زیر سطح کشت قرار دارند. نسبت سود در واحد سطح در کنار نتایج درجه مرکزیت نشان می‌دهد جوامعی که درجه مرکزیت بیشتری در سطح خرد شبکه برخوردار بودند، توانسته‌اند نسبت سود بر مساحت بیشتری را تجربه کنند. درجه مرکزیت به‌عنوان یکی از قوی‌ترین سنجه‌های تحلیل شبکه می‌تواند میزان اتصال یک گره را به سایر گره‌های شبکه بر مبنای تعداد یال‌های آن بسنجد. درواقع هر چه تعداد روابط یک گره با سایر گره‌های شبکه بیشتر باشد، درجه مرکزیت آن گره بیشتر است. در تفسیر فیزیکی درجه مرکزیت هرچه کشاورز با تعداد کشاورزان بیشتری در ارتباط باشد، درجه مرکزیت او بالاتر است و درنتیجه سطح همکاری کشاورز با سایر کشاورزان بیشتر است. ارتباط مستقیم میان میانگین درجه مرکزیت در جامعه و میانگین سود در واحد سطح جامعه نشان‌دهنده اهمیت همکاری و سطح ارتباطات میان ذینفعان است.

Table 2. The overall status of communities and their average indices in social network analysis

Community number	Size of the community	Water consumption (MCM)	Cultivation Area (Hectare)	Profit (Million Rials per Hectare)	Average degree Centrality	Average degree Eigenvector
0	80	2.1	97.3	238.6	0.92	0.11
1	90	50.4	2560.5	85.7	0.18	0.08
2	77	24.4	1304.6	96.9	0.08	0.07
3	126	2.8	159.9	193.0	0.91	0.09
4	109	14.8	835.2	122.8	0.57	0.09
5	121	2.5	145.2	189.8	0.85	0.09
6	76	8.2	478.8	122.2	0.64	0.11
7	33	17.7	1028	33.8	0.51	0.16
8	91	40.6	2422	69.0	0.07	0.04
9	68	24.7	1544.1	89.5	0.09	0.07
10	41	15.6	981	48.7	0.18	0.11
11	79	8.6	564.2	114.7	0.63	0.11
12	117	15.1	1020.2	105.2	0.27	0.08
13	35	15.2	1030	45.2	0.20	0.12
14	61	8.4	573	124.0	0.46	0.12
15	157	28.3	1929.7	102.8	0.30	0.07
16	57	9.1	645.9	67.0	0.27	0.11
17	105	9.5	896.2	104.3	0.49	0.09
18	46	3.3	383.45	144.8	0.54	0.14
Total	1569	301.4	18599	2098	8.16	1.8

میانگین بردار ویژه برای تأثیرگذاری خرد شبکه‌ها در سطح کلان شبکه مورد بررسی قرار می‌گیرد. مؤلفه بردار ویژه علاوه بر سنجش میزان اتصال گره به سایر گره‌ها در شبکه اهمیت و تأثیرگذاری روابط گره را می‌سنجد. در تفسیر فیزیکی آن می‌توان به کشاورزی اشاره کرد که با تعداد بسیار زیادی از کشاورزان در ارتباط است ولی این ارتباط‌ها در موقعیت مناسبی برای انتشار اطلاعات نیستند و اهمیت پایینی دارند، درنتیجه مؤلفه بردار ویژه آن کشاورز کم است. در مقابل کشاورزی که تعداد کمتری ارتباط با سایر کشاورزان دارد ولی این ارتباطات توانایی انتشار اطلاعات و اهمیت بالایی دارند، می‌تواند از مقدار بردار ویژه بالاتری برخوردار باشد. درواقع مؤلفه بردار ویژه میزان تأثیرگذاری یک گره را بر سایر اجزای شبکه تعیین می‌کند و مقدار میانگین مؤلفه بردار ویژه اعضای یک جامعه می‌تواند سطح تأثیر آن جامعه بر سایر جوامع را مشخص کند. درنهایت با توجه به نتایج، مقدار کم

بردار ویژه تمام جوامع در محدوده دشت اصفهان-برخوار نشان‌دهنده تأثیرپذیری ضعیف جوامع از یکدیگر در سطح کلان شبکه است. شاخص میانگین در بررسی سنجه‌های شبکه نظیر درجه مرکزیت و بردار ویژه قیاس منصفانه جوامع نسبت به یکدیگر را میسر می‌کند.این مؤلفه‌ها می‌توانند وضعیت جوامع را در ارتباط با انتقال اطلاعات و تجربه و منابع میان یکدیگر نشان دهند. با توجه به شکل(۷) و شکل(۸) می‌توان سازگاری جوامع با شرایط کم‌آبی را در بازه سال‌های ۱۳۸۹ تا ۱۳۹٤ موردبررسی قرار داد. در شکل (۷) تعداد اعضای هر جامعه، اندازه شعاع دایره معرف همان جامعه در شبکه است. همچنین شماره معرف جامعه در کنار هر دایره ذکر شده است. جوامع شماره صفر، پنج، سه و ۱۸ به ترتیب با توجه به نسبت سود خالص بر مساحت زیر کشت، ازنظر عملکرد اقتصادی بهترین جوامع دشت اصفهان-برخوار هستند. جامعه شماره ۱۸ تنها جامعه‌ای بود که نسبت سود در واحد سطح در آن از نسبت مصرف آب در واحد سطح پیشی گرفته است. این چهار جامعه در بخش جنوب غربی منطقه مورد مطالعه و همگی در همسایگی یکدیگر واقع شده‌اند. این امر نشان می‌دهد جوامع از همسایگی یکدیگر تأثیر می‌گیرند و بر یکدیگر اثر می‌گذارند. درجه مرکزیت این جوامع به‌طور میانگین بیش از ۰/۸ می‌باشد که نشان‌دهنده ارتباط قوی ذینفعان در این جوامع است. از دیگر دلایل برتری این جوامع می‌توان فاصله کمتر به شهر اصفهان و بهره‌مندی از حقابه رودخانه زاینده‌رود نیز اشاره کرد. میانگین بردار ویژه برابر با حدود ۰/۱ است که مقدار بسیار ناچیزی برای اثرگذاری در سطح کلان شبکه محسوب می‌شود.. جوامع هفت، ۱۳ و ۱۰ ضعیف‌ترین عملکرد اقتصادی را در واحد سطح داشتند. میزان مصرف آب در واحد سطح این جوامع به ترتیب برابر ۱۷۱۰۰ و ۱۵۰۰۰ و ۱٦۰۰۰ مترمکعب است. این اعداد بیشتر یا برابر با میانگین مصرف آب در واحد سطح کل شبکه با عدد ۱۵۹۰۰ مترمکعب در هر هکتار است. بنابراین این جوامع با بهره‌گیری از تجربه جوامع موفق می‌توانند بهره‌وری بیشتری داشته باشند. همچنین جامعه‌های شماره هفت و ۱۰ در جبهه‌های ورودی آبخوان واقع شده‌اند و رویکرد این جوامع نسبت به منابع آب‌های زیرزمینی اهمیت بیشتری دارد و تغییر آن ضروری است.

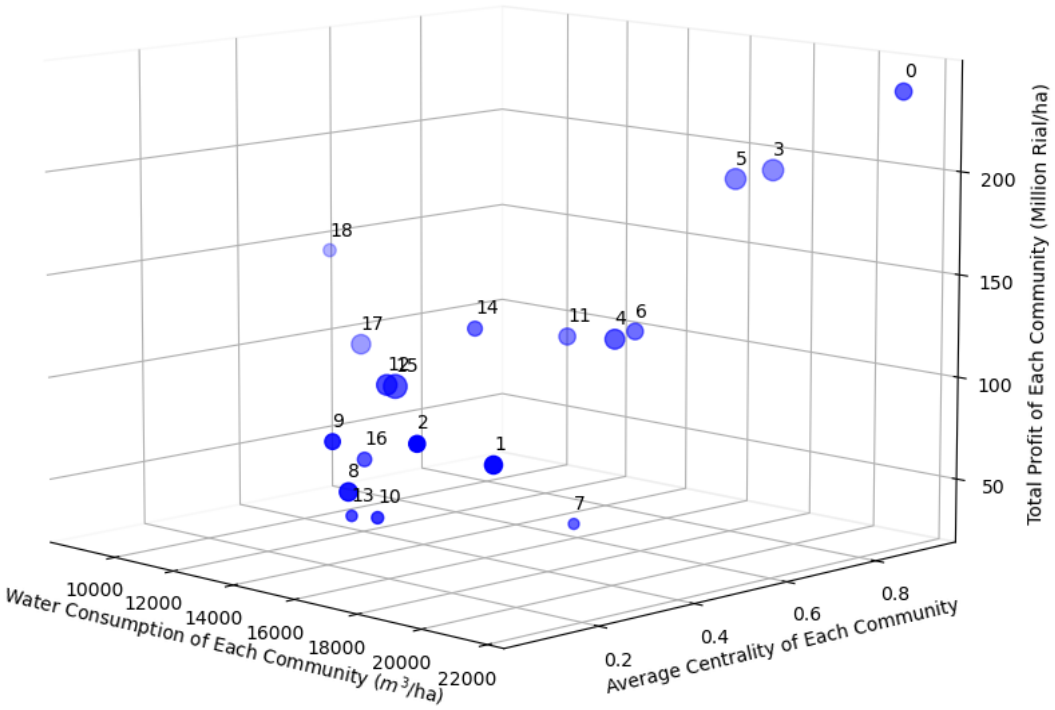

Figure 7. Ranking of communities on social networks based on the following parameters: water consumption (m^3) per unit area (hectare), profit (million rials) per unit area (hectare), and the average degree centrality in each community.

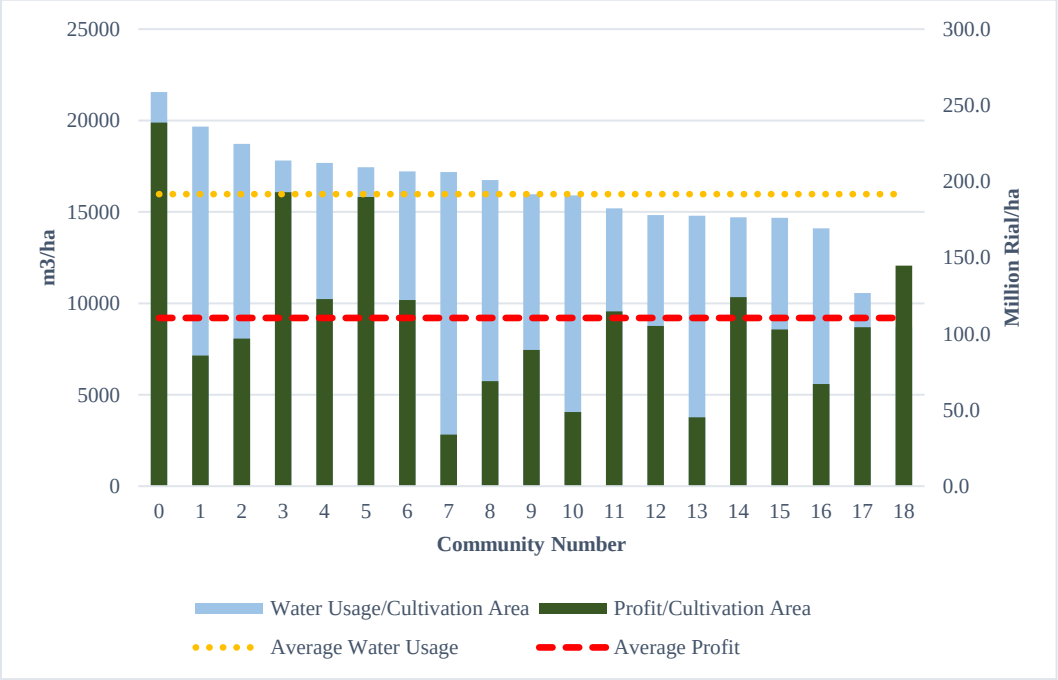

Figure 8. Comparison of the performance of communities in relation to water harvested from aquifers per unit area and economic profit per unit area

٤. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، شبکه اجتماعی کشاورزان دشت اصفهان-برخوار مورد تحلیل قرار گرفت. در این شبکه ۱۹ جامعه شناسایی شده است. با بررسی ویژگی‌های این جوامع و عملکرد آن‌ها می‌توان سطح سازگاری با کم‌آبی را در محدوده مورد مطالعه ارزیابی کرد. مؤلفه درجه مرکزیت به‌عنوان نشان‌دهنده سطح ارتباط و همکاری میان جوامع جنوب غربی دشت اصفهان-برخوار بسیار بالا بوده و این جوامع توانسته‌اند سود بیشتری در واحد سطح نسبت به سایر جوامع کسب کنند. تنها یکی از این پنج جامعه برتر، نسبت سود در واحد سطح بالاتری نسبت به مصرف آب در واحد سطح داشته است. بنابراین، در این منطقه ضروری است که تجربه و اطلاعات میان جوامع به اشتراک گذاشته شود تا در آینده همه جوامع بتوانند درحالی‌که سود حاصل از کشاورزی را حفظ می‌کنند، اضافه برداشت از آب‌های زیرزمینی را مدیریت کنند. این امر می‌تواند ذینفعان را در مواجهه با بحران‌هایی نظیر کم‌آبی مقاوم‌تر کرده و سطح سازگاری آن‌ها را با پدیده کم‌آبی افزایش دهد. سایر جوامع که عمدتاً در نواحی شمالی و مرکزی آبخوان واقع شده‌اند، علی‌رغم برداشت مشابه از آب‌های زیرزمینی، نتوانسته‌اند عملکرد خوبی از نظر سود در واحد سطح داشته باشند. با تقویت ارتباط میان جوامع جنوب غربی و سایر جوامع دشت اصفهان-برخوار، می‌توان سطح سازگاری با کم‌آبی را در کل شبکه ارتقا داد. جوامعی که پیوندهای ارتباطی بیشتری دارند، می‌توانند راه‌حل‌های متنوع‌تری برای تأمین نیازهای خود بیابند و دسترسی بهتری به منابع شبکه، نظیر تجربیات سایر کشاورزان، داشته باشند. نتایج نشان می‌دهد که جوامع محلی موفق، دارای بردار ویژه بسیار پایینی هستند و بنابراین تأثیر چندانی بر سایر جوامع در سطح کلان شبکه ندارند. همچنین، ذینفعان تمایلی به حضور در جوامع بزرگ‌تر ندارند و ادغام شبکه‌های محلی در یک شبکه بزرگ‌تر ممکن است از نظر بهبود سازگاری با کم‌آبی ناموفق باشد. برای ارتقای سازگاری با کم‌آبی در دشت اصفهان-برخوار، نیاز است که ارتباطات میان جوامع تقویت شده و مسیر انتقال تجربه بهبود یابد تا وضعیت منابع آب و رفاه اجتماعی ارتقا یابد. همچنین، مدیریت جوامع بالادست حوضه و نزدیک به جبهه‌های ورودی آبخوان ضروری است، زیرا رویکرد این جوامع می‌تواند تأثیر زیادی بر تغذیه آبخوان از لایه‌های زیرسطحی داشته باشد.

٥. پی‌نوشت‌ها

1. Newman
2. Modularity
3. Resilience
4. Resolution
5. Louvain

منابع

Berkes, F., Colding, J., & Folke, C. (2008). *Navigating social-ecological systems: building resilience for complexity and change*. Cambridge university press.

Blondel, V. D., Guillaume, J.-L., Lambiotte, R., & Lefebvre, E. (2008). Fast unfolding of communities in large networks. *Journal of statistical mechanics: theory and experiment*, *2008*(10), P10008.

Bodin, Ö., & Crona, B. I. (2009). The role of social networks in natural resource governance: What relational patterns make a difference? *Global environmental change*, *19*(3), 366-374.

Bonacich, P. (1972). Technique for analyzing overlapping memberships. *Sociological methodology*, *4*, 176-185.

Breiger, R. L. (2004). The analysis of social networks. *Handbook of data analysis*, 505-526.

Clauset, A., Newman, M. E., & Moore, C. (2004). Finding community structure in very large networks. *Physical review E*, *70*(6), 066111.

Crona, B., & Bodin, Ö. (2006). What you know is who you know? Communication patterns among resource users as a prerequisite for co-management. *Ecology and society*, *11*(2).

De Nooy, W., Mrvar, A., & Batagelj, V. (2018). *Exploratory social network analysis with Pajek: Revised and expanded edition for updated software* (Vol. 46). Cambridge university press.

Fliervoet, J. M., Geerling, G. W., Mostert, E., & Smits, A. J. (2016). Analyzing collaborative governance through social network analysis: a case study of river management along the Waal River in The Netherlands. *Environmental management*, *57*, 355-367.

Fortunato, S. (2010). Community detection in graphs. *Physics reports*, *486*(3-5), 75-174.

Girvan, M., & Newman, M. E. (2002). Community structure in social and biological networks. *Proceedings of the national Academy of sciences*, *99*(12), 7821-7826.

Golkarami, A., & Kaviani Rad, M. (2017). The effect of limited water resources on hydropolitic tensions (Case Study: Iran's central catchment with emphasis on Zayandehrood basin). *Geography and Environmental Planning*, *28*(1), 113-134.

Newig, J., Günther, D., & Pahl-Wostl, C. (2010). Synapses in the network: learning in governance networks in the context of environmental management. *Ecology and society*, *15*(4).

Ohab, Y. S., & Ahmadi, A. (2018). Evaluating and simulation of the behavior and interactions of stakeholders and regional water company under agent-based model framework, In Lenjanat sub-basin of Zayandehrood River Basin. *Iran-Water Resources Research*, *14(2)*, 142-154 (In Persian).

Ostad-Ali-Askari, K., Ghorbanizadeh Kharazi, H., Shayannejad, M., & Zareian, M. J. (2019). Effect of management strategies on reducing negative impacts of climate change on water resources of the Isfahan–Borkhar aquifer using MODFLOW. *River Research and Applications*, *35*(6), 611-631.

Rahimi-Feyzabad, F., Yazdanpanah, M., Gholamrezai, S., & Ahmadvand, M. (2022). Social network analysis of institutions involved in groundwater resources management: Lessons learned from Iran. *Journal of Hydrology*, *613*, 128442.

Reed, M. S., Graves, A., Dandy, N., Posthumus, H., Hubacek, K., Morris, J., Prell, C., Quinn, C. H., & Stringer, L. C. (2009). Who's in and why? A typology of stakeholder analysis methods for natural resource management. *Journal of environmental management*, *90*(5), 1933-1949.

Stein, C., Ernstson, H., & Barron, J. (2011). A social network approach to analyzing water governance: The case of the Mkindo catchment, Tanzania. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, *36*(14-15), 1085-1092.

VanderWeele, T. J. (2011). Sensitivity Analysis for Contagion Effects in Social Networks. *Sociological Methods & Research*, *40*(2), 240-255. https://doi.org/10.1177/0049124111404821

Ward, S., Meng, F., Bunney, S., Diao, K., & Butler, D. (2020). Animating inter-organisational resilience communication: A participatory social network analysis of water governance in the UK. *Heliyon*, *6*(10).

Yao, B., Zhu, J., Ma, P., Gao, K., & Ren, X. (2023). A Constrained Louvain Algorithm with a Novel Modularity. *Applied Sciences*, *13*(6), 4045.

Zanjanian, H., Abdolabadi, H., Niksokhan, M. H., & Sarang, A. (2018). Influential third party on water right conflict: A Game Theory approach to achieve the desired equilibrium (case study: Ilam dam, Iran). *Journal of environmental management*, *214*, 283-294.

Evaluation of Spatial Community Interactions in Adaptation to Water Scarcity Using Social Network Analysis, Case Study: Esfahan-Borkhar Plain

Hamoon Yousefi[1] | Azadeh Ahmadi[2]✉

1. Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shadid Beheshti University, Tehran, Iran. Email: hamoonyosefi@ymail.com

2. Corresponding Author, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shadid Beheshti University, Tehran, Iran. Email: az_ahmadi@sbu.ac.ir

Abstract

In this study, using social network analysis, the local communities of the Esfahan-Borkhar plain and their capacity to adapt to water scarcity have been examined. To identify these communities at the network level, political and natural boundaries, such as county borders, existing irrigation channels, the geographical locations of extraction wells, as well as the type and extent of crops grown by farmers and their water usage in the studied area, were utilized. A total of 1,569 stakeholders and 19 communities within the study area were identified between the years 2010 and 2015. The characteristics of these communities, such as water consumption per unit area, agricultural profit per unit area, and social network analysis metrics including centrality degree and eigenvector were calculated using object-oriented programming in Python. This was done to establish the relationship between the stakeholder network and the groundwater resource status in the studied area and to rank the communities accordingly. The results indicate that the average water consumption of all communities is approximately 16,000 cubic meters per hectare, the average profit per hectare is 110 million Rials, and the average centrality degree is 0.43. Communities located in the southwestern regions of the area, with an average profit of 190 million Rials per hectare, are the top communities in terms of economic productivity. Additionally, the top communities, with an average centrality degree of 0.8, have the highest level of stakeholder interactions at the micro-network level compared to other communities. Communities with the lowest economic productivity are located in the northern and western regions of the Esfahan-Borkhar plain, near the aquifer's recharge areas, and a change in these communities' approach to water resources is necessary. If overall network productivity is increased through strengthened inter-community connections, a reduction in the aquifer's decline, alongside improved adaptation to water scarcity and stakeholder welfare across the entire study area, is conceivable.

Keywords: Adoption, Groundwater, SNA, Zayande-Rud.