



دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی عمران

**توسعه و ارزیابی یک مدل به هم پیوسته عامل بنیان-آب زیرزمینی در مدیریت  
پایدار آب کشاورزی؛ مطالعه موردی: دشت اصفهان- برخوار**

**Development and Assessment of an Agent-Based-Groundwater Model (ABM-GW) in  
Sustainable Management of Agricultural Water; Case Study: Isfahan-Borkhar Plain**

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران - مهندسی و مدیریت منابع آب

زهرا سلیمانزاده

اساتید راهنما

دکتر آزاده احمدی



دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران - مهندسی و مدیریت منابع آب

خانم زهرا سلیمان زاده

تحت عنوان

توسعه و ارزیابی یک مدل به هم پیوسته عامل بنیان-آب زیرزمینی در مدیریت پایدار آب  
کشاورزی؛ مطالعه موردی: دشت اصفهان- بر خوار

در تاریخ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

امضاء	دکتر آزاده احمدی	استاد راهنمای اول پایان نامه
امضاء	دکتر محمدحسین گل محمدی	استاد داور
امضاء	دکتر.....	استاد داور
امضاء	دکتر سید بشیر موحدیان عطار	سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده



مشکر و قدردانی

کلیه حقوق مالکیت مادی و معنوی مربوط به این پایان نامه متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان و پدیدآورندگان است. این حقوق توسط دانشگاه صنعتی اصفهان و براساس خط مشی مالکیت فکری این دانشگاه، ارزش گذاری و سهم بندی خواهد شد.

هرگونه بهره برداری از محتوا، نتایج یا اقدام برای تجاری سازی دستاوردهای این پایان نامه تنها با مجوز کتبی دانشگاه صنعتی اصفهان امکان پذیر است.

تقديم

## فهرست مطالب

عنوان	صفحه
<b>فصل اول: مقدمه</b> .....	۱
۱-۱- پیشگفتار.....	۱
۱-۲- تبیین مسئله و ضرورت پژوهش.....	۲
۱-۳- اهداف و نوآوری‌های پژوهش.....	۴
۱-۴- الگوریتم انجام پژوهش.....	۵
۱-۵- ملاحظه‌ها و فرض‌های پژوهش.....	۶
۱-۶- سازماندهی فصل‌های پایان‌نامه.....	۷
<b>فصل دوم: پیشینه پژوهش</b> .....	۸
۲-۱- مقدمه.....	۸
۲-۲- سیستم‌های جفت‌شده انسان و طبیعت (CHANS).....	۹
۲-۳- پیشینه مدل‌سازی غیرمتمرکز در سیستم‌های هیدرولوژیکی-اجتماعی.....	۱۶
۲-۴- کاربرد مدل‌های عامل‌بنیان در مدیریت منابع آب.....	۱۷
۲-۵- پیشینه کاربرد تئوری‌های اجتماعی در مدل‌های عامل‌بنیان.....	۲۶
۲-۶- جمع‌بندی پیشینه تحقیقات با تأکید بر جنبه‌های نوآوری تحقیق پیش‌رو.....	۳۱
<b>فصل سوم: روش تحقیق و چارچوب مدل پیشنهادی</b> .....	۳۳
۳-۱- مقدمه.....	۳۳
۳-۲- چارچوب مفهومی مدل اجتماعی-هیدرولوژیکی پیشنهادی.....	۳۴
۳-۳- چارچوب ریاضیاتی و الگوریتم انجام پژوهش.....	۳۵
۳-۴- توسعه مدل هیدرولوژیکی.....	۳۸
۳-۴-۱- معادلات حاکم بر جریان آب زیرزمینی.....	۳۸
۳-۴-۲- معرفی مدل MODFLOW.....	۳۹
۳-۴-۳- پارامترهای مؤثر در شبیه‌سازی آبخوان.....	۴۰
۳-۴-۳-۱- ضریب هدایت هیدرولیکی (K).....	۴۰
۳-۴-۳-۲- مقادیر تغذیه و تخلیه آبخوان.....	۴۱
۳-۴-۳-۳- ضریب آبدهی ویژه.....	۴۱
۳-۴-۳-۴- طراحی و اجرای مدل هیدرولوژیکی.....	۴۲

۴۳	..... ۳-۵- توسعه شبیه‌ساز اجتماعی عامل‌بنیان
۴۴	..... ۳-۵-۱- توسعه چارچوب تئوری رفتار برنامه‌ریزی شده
۵۲	..... ۳-۵-۲- فرآیند تصمیم‌گیری کشاورزان
۵۴	..... ۳-۵-۲-۱- کشاورزان فعال
۵۵	..... ۳-۵-۲-۲- کشاورزان تعاملی
۵۵	..... ۳-۵-۲-۳- کشاورزان نیمه‌ادراکی
۵۷	..... ۳-۵-۲-۴- کشاورزان ادراکی
۵۸	..... ۳-۵-۳- محاسبه منافع حاصل از کشاورزی
۵۹	..... ۳-۶- اتصال مدل شبیه‌ساز رفتاری به مدل هیدرولوژیکی
۶۰	..... ۳-۷- کالیبراسیون و صحت‌سنجی مدل توسعه‌یافته
۶۱	..... ۳-۷-۱- واسنجی و صحت‌سنجی مدل آب زیرزمینی
۶۲	..... ۳-۷-۲- کالیبراسیون مدل هیدرولوژیکی-اجتماعی
۶۴	..... ۳-۸- جمع‌بندی
۶۶	..... <b>فصل چهارم: شناسائی محدوده مطالعاتی</b>
۶۶	..... ۴-۱- مقدمه
۶۶	..... ۴-۲- معرفی حوضه آبریز گاوخونی
۶۸	..... ۴-۳- معرفی آبخوان اصفهان-برخوار
۶۹	..... ۴-۴- مشخصات اقلیمی محدوده مطالعاتی
۷۱	..... ۴-۵- وضعیت منابع و مصارف آب
۷۱	..... ۴-۵-۱- منابع آب سطحی
۷۴	..... ۴-۵-۲- منابع آب زیرزمینی
۷۹	..... ۴-۵-۳- مصارف آب
۸۰	..... ۴-۶- سیمای اجتماعی-فرهنگی محدوده
۸۲	..... ۴-۷- سیمای کشاورزی
۸۲	..... ۴-۷-۱- سطح کشت اراضی آبی
۸۳	..... ۴-۷-۲- نیاز خالص آبی محصولات
۸۴	..... ۴-۷-۳- ضریب حساسیت محصولات به کم‌آبی
۸۴	..... ۴-۷-۴- عملکرد محصولات
۸۵	..... ۴-۷-۵- راندمان آبیاری
۸۵	..... ۴-۷-۶- اقتصاد کشاورزی

۸۶	۸-۴- اهداف انتخاب محدوده مطالعاتی .....
۸۶	۹-۴- جمع‌بندی .....
۸۷	<b>فصل پنجم: نتایج حاصل از به‌کارگیری روش تحقیق در محدوده مطالعاتی .....</b>
۸۷	۱-۵- مقدمه .....
۸۷	۲-۵- نتایج شبیه‌سازی آب زیرزمینی .....
۸۷	۱-۲-۵- ملاحظات اولیه توسعه مدل آب زیرزمینی .....
۹۰	۲-۲-۵- نتایج اجرای مدل در حالت ماندگار .....
۹۳	۳-۲-۵- نتایج اجرای مدل در حالت ناماندگار .....
۹۹	۳-۵- نتایج صحت‌سنجی چارچوب اجتماعی-هیدرولوژیکی پیشنهادی .....
۱۰۰	۱-۳-۵- کالیبراسیون سطح آب زیرزمینی .....
۱۰۳	۲-۳-۵- صحت‌سنجی سطح زیر کشت .....
۱۰۵	۴-۵- نتایج مدل‌سازی اجتماعی در مدل عامل‌بنیان .....
۱۰۹	۵-۵- بررسی نتایج سناریوهای مدیریتی .....
۱۰۹	۱-۵-۵- سناریو اجتماعی .....
۱۱۳	۲-۵-۵- سناریو افزایش قیمت محصولات کم‌آب‌بر .....
۱۱۵	۳-۵-۵- سناریو اعمال جریمه برای کشت محصولات پرآب‌بر .....
۱۱۹	۴-۵-۵- سناریو بازار آب .....
۱۲۳	۶-۵- جمع‌بندی .....
۱۲۵	<b>فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها .....</b>
۱۲۵	۱-۶- مقدمه .....
۱۲۵	۲-۶- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری .....
۱۲۹	۳-۶- پیشنهادها .....
۱۳۰	<b>مراجع .....</b>

## فهرست شکل ها

عنوان	صفحه
شکل ۲- ۱ چارچوب کلی تئوری رفتار برنامه ریزی شده (TPB)-----	۲۹
شکل ۳- ۱ چارچوب کلی مدل پیشنهادی و نحوه ارتباط زیرمدل ها -----	۳۴
شکل ۳- ۲ فلوچارت چارچوب هیدرولوژیکی_اجتماعی پیشنهادی -----	۳۷
شکل ۳- ۳ فلوچارت روند شبیه سازی آب زیرزمینی در نرم افزار MODFLOW -----	۴۳
شکل ۳- ۴ حالت های مختلف کشت زمین های چند محصولی در مدل سازی -----	۵۴
شکل ۳- ۵ فلوچارت روند بهینه سازی در الگوریتم ژنتیک [۱۸]-----	۶۳
شکل ۴- ۱ نقشه ایران و محدوده های مطالعاتی در حوضه آبریز گاوخونی -----	۶۸
شکل ۴- ۲ تراز ارتفاعی و تفکیک محدوده دشت و آبخوان آبرفتی اصفهان-برخوار -----	۶۹
شکل ۴- ۳ موقعیت رودخانه و شبکه های مدرن آبیاری در دشت اصفهان-برخوار[۹]-----	۷۲
شکل ۴- ۴ موقعیت تصفیه خانه ها، چاه های مشاهداتی و چاه های اکتشافی در محدوده آبخوان -----	۷۵
شکل ۴- ۵ تغییرات قابلیت انتقال در محدوده آبخوان اصفهان-برخوار -----	۷۶
شکل ۴- ۶ تراز سنگ کف در محدوده آبخوان آبرفتی اصفهان-برخوار -----	۷۶
شکل ۴- ۷ هیدروگراف معرف آبخوان آبرفتی اصفهان-برخوار -----	۷۷
شکل ۴- ۸ افت تجمعی آبخوان اصفهان برخوار برای سال های ۱۳۶۱-۱۳۹۷ -----	۷۷
شکل ۴- ۹ موقعیت چاه های بهره برداری مجاز و غیرمجاز، چشمه و قنات در محدوده اصفهان-برخوار -----	۷۸
شکل ۵- ۱ محل جبهه های ورودی و خرجی در محدوده اصفهان-برخوار -----	۸۹
شکل ۵- ۲ نحوه شبکه بندی محدوده اصفهان-برخوار -----	۹۰
شکل ۵- ۳ مقادیر کالیبره شده هدایت هیدرولیکی در محدوده اصفهان-برخوار (متربروز) -----	۹۴
شکل ۵- ۴ مقادیر کالیبره شده آبدهی ویژه در محدوده اصفهان-برخوار -----	۹۴
شکل ۵- ۵ تراز آب زیرزمینی مشاهداتی و محاسباتی در تمام چاه های مشاهداتی در شهریور ۱۳۹۸ -----	۹۶
شکل ۵- ۶ متوسط تراز آب زیرزمینی در گستره آبخوان اصفهان-برخوار -----	۹۷
شکل ۵- ۷ تراز آب مشاهداتی و شبیه سازی شده در کل دوره مدل سازی در چاه های مشاهداتی: الف) قلعه دوقلو؛ ب) بین حبیب آباد و کمشچه؛ پ) یونارت و ت) یاقوت آباد جدید. -----	۹۷
شکل ۵- ۸ تراز آب زیرزمینی شبیه سازی شده در مهر ۱۳۸۹ -----	۹۸
شکل ۵- ۹ تراز آب زیرزمینی شبیه سازی شده در شهریور ۱۳۹۸ -----	۹۸

- شکل ۵- ۱۰ میانگین تراز آب مشاهداتی و محاسباتی در مدل هیدرولوژیکی و اجتماعی-هیدرولوژیکی در گستره آبخوان ----- ۱۰۱
- شکل ۵- ۱۱ تراز آب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در کل دوره مدل‌سازی در چاه‌های مشاهداتی: الف) پل سرهنگ؛ ب) تقاطع اتوبان خورزوق؛ پ) سه‌راهی سهل آباد و ت) یونارت ----- ۱۰۲
- شکل ۵- ۱۲ سطح زیر کشت محاسباتی و مشاهداتی سه محصول گندم، جو و ذرت ----- ۱۰۴
- شکل ۵- ۱۳ سطح زیر کشت محاسباتی و مشاهداتی سه محصول یونجه، خربزه و چغندرقد ----- ۱۰۴
- شکل ۵- ۱۴ میانگین محدودیت تصمیم‌گیری سالانه کشاورزان در برداشت آب زیرزمینی ----- ۱۰۷
- شکل ۵- ۱۵ مجموع سود عوامل کشاورز در کل دوره شبیه‌سازی ----- ۱۰۷
- شکل ۵- ۱۶ سطح زیر کشت محصولات در دوره تصمیم‌گیری در مقایسه با دوره تاریخی ----- ۱۰۸
- شکل ۵- ۱۷ سطح کشت محصولات در دوره تصمیم‌گیری در سناریوی اجتماعی ----- ۱۱۱
- شکل ۵- ۱۸ مجموع سود عوامل کشاورز در سناریوی اجتماعی در دوره تصمیم‌گیری ----- ۱۱۲
- شکل ۵- ۱۹ میانگین تراز آب وضعیت کنونی و سناریوی اجتماعی در گستره آبخوان ----- ۱۱۲
- شکل ۵- ۲۰ سطح کشت محصولات در دوره تصمیم‌گیری در سناریوی افزایش قیمت محصولات کم‌آب بر ----- ۱۱۴
- شکل ۵- ۲۱ مجموع سود عوامل کشاورز در سناریوی افزایش قیمت محصولات در دوره تصمیم‌گیری ----- ۱۱۴
- شکل ۵- ۲۲ میانگین تراز آب وضعیت کنونی و سناریوی افزایش قیمت محصولات منتخب در گستره آبخوان ----- ۱۱۵
- شکل ۵- ۲۳ سطح کشت محصولات در دوره تصمیم‌گیری در سناریوی اعمال جریمه برای محصولات پرآب بر ----- ۱۱۷
- شکل ۵- ۲۴ مجموع سود عوامل کشاورز در سناریوی اعمال جریمه برای محصولات پرآب بر در دوره تصمیم‌گیری ----- ۱۱۸
- شکل ۵- ۲۵ میانگین تراز آب وضعیت کنونی و سناریوی اعمال جریمه برای محصولات منتخب در گستره آبخوان ----- ۱۱۹
- شکل ۵- ۲۶ سطح کشت محصولات در دوره تصمیم‌گیری در سناریوی بازار آب ----- ۱۲۱
- شکل ۵- ۲۷ سطح تحت کشت کاهش یافته در سناریوی بازار آب زیرزمینی ----- ۱۲۲
- شکل ۵- ۲۸ مجموع سود عوامل کشاورز در سناریوی بازار آب در دوره تصمیم‌گیری ----- ۱۲۲
- شکل ۵- ۲۹ میانگین تراز آب وضعیت کنونی و سناریوی بازار آب در گستره آبخوان ----- ۱۲۳



## فهرست جدول‌ها

صفحه	عنوان
۴۵	جدول ۳-۲ پارامترهای اجتماعی مؤثر در رفتار کشاورزان -----
۷۰	جدول ۴-۱ مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی در محدوده اصفهان-برخوار -----
۷۰	جدول ۴-۲ متوسط دما به تفکیک دشت و ارتفاعات در محدوده اصفهان-برخوار (درجه سانتیگراد) [۶]-----
۷۰	جدول ۴-۳ توزیع ماهانه بارش به تفکیک دشت و ارتفاعات در محدوده اصفهان-برخوار (میلیمتر) [۶]-----
۷۰	جدول ۴-۴ توزیع ماهانه تبخیر به تفکیک دشت و ارتفاعات در محدوده اصفهان-برخوار (میلیمتر) [۶]-----
۷۱	جدول ۴-۵ توزیع ماهانه تبخیر از سطح آزاد به تفکیک دشت و ارتفاعات در محدوده اصفهان-برخوار (میلیمتر) [۶]-----
۷۱	-----
۷۲	جدول ۴-۶ مشخصات ایستگاههای هیدرومتری محدوده اصفهان-برخوار -----
۷۳	جدول ۴-۷ حجم ماهانه آب تخصیص یافته به شبکه آبیاری برخوار (میلیون مترمکعب) [۸]-----
۷۴	جدول ۴-۸ اطلاعات مربوط به مصرف کنندگان فعلی تصفیه‌خانه شاهین شهر [۱۰]-----
۷۴	جدول ۴-۹ اطلاعات مربوط به مصرف کنندگان فعلی تصفیه خانه شمال [۱۱]-----
۷۸	جدول ۴-۱۰ تعداد منابع و مقدار تخلیه آب زیرزمینی محدوده اصفهان-برخوار (میلیون مترمکعب) [۶]-----
۷۹	جدول ۴-۱۱ گزارش بیلان آب زیرزمینی در سال آبی ۱۳۹۰-۱۳۸۹ آبخوان اصفهان-برخوار (میلیون مترمکعب) [۶]-----
۷۹	-----
۷۹	جدول ۴-۱۲ حجم مصارف آبی در آبخوان اصفهان-برخوار در سال آبی ۱۳۸۹-۱۳۹۰ (میلیون مترمکعب) [۶]-----
۸۰	جدول ۴-۱۳ جمعیت ساکن در محدوده اصفهان-برخوار به تفکیک شهرستان [۱۴]-----
۸۱	جدول ۴-۱۴ تعداد شاغلین بالای ۱۰ سال به تفکیک شهرستان در محدوده اصفهان-برخوار [۱۵]-----
۸۲	جدول ۴-۱۵ تعداد افراد شاغل به تفکیک باسواد و بی سواد در محدوده اصفهان-برخوار -----
۸۲	جدول ۴-۱۶ درصد کشاورزان به تفکیک سطح تحصیل در محدوده اصفهان برخوار -----
۸۲	جدول ۴-۱۷ درصد کشاورزان متعلق به هر گروه سنی در محدوده اصفهان-برخوار -----
۸۳	جدول ۴-۱۸ درصد سطح کشت محصولات زراعی در محدوده اصفهان-برخوار -----
۸۳	جدول ۴-۱۹ نیاز خالص آبی محصولات زراعی در محدوده اصفهان-برخوار (مترمکعب درهکتار)-----
۸۴	جدول ۴-۲۰ ضریب حساسیت به تنش آبی محصولات زراعی [۱۷]-----
۸۵	جدول ۴-۲۱ عملکرد محصولات زراعی ( کیلوگرم در هکتار) -----
۸۵	جدول ۴-۲۲ هزینه کشاورزی و قیمت فروش محصولات سال آبی ۱۳۹۷ -----

- جدول ۵-۱** تراز آب زیرزمینی مشاهداتی و محاسباتی در چاه‌های مشاهداتی محدوده اصفهان-برخوار در حالت ماندگار  
 ۹۲-----
- جدول ۵-۲** خطای مدل در حالت ماندگار  
 ۹۲-----
- جدول ۵-۳** خطای مدل آب زیرزمینی محدوده اصفهان-برخوار  
 ۹۵-----
- جدول ۵-۴** مقادیر بهینه و محدوده متغیرهای تصمیم در الگوریتم ژنتیک پیشنهادی  
 ۱۰۰-----
- جدول ۵-۵** خطای چارچوب اجتماعی-هیدرولوژیکی پیشنهادی  
 ۱۰۱-----
- جدول ۵-۶** تعداد عوامل کشاورز از هر گروه رفتاری در طول دوره تصمیم‌گیری  
 ۱۰۶-----
- جدول ۵-۷** تعداد عوامل کشاورز از هر گروه رفتاری در طول دوره تصمیم‌گیری در سناریوی اجتماعی  
 ۱۱۰-----
- جدول ۵-۸** تعداد عوامل کشاورز از هر گروه رفتاری در سناریوی افزایش قیمت محصولات کم‌آب  
 ۱۱۳-----
- جدول ۵-۹** تعداد عوامل کشاورز از هر گروه رفتاری در سناریوی اعمال جریمه برای محصولات پرآب  
 ۱۱۷-----
- جدول ۵-۱۰** تعداد عوامل کشاورز از هر گروه رفتاری در سناریوی بازار آب  
 ۱۲۰-----
- جدول ۵-۱۱** خلاصه نتایج اجرای سناریوهای مدیریتی  
 ۱۲۴-----

## چکیده

بررسی رفتار کشاورزان در یک محدوده مطالعاتی با توجه به تنوع خصوصیات فردی و معیارهای تصمیم‌گیری آن‌ها در اتخاذ استراتژی‌های صرفه‌جویی در مصرف آب اهمیت بالایی دارد. بدین ترتیب، این مطالعه با تدوین یک سازوکار اجتماعی-هیدرولوژیکی به بررسی تأثیر پارامترهای روان‌شناختی و اجتماعی و ناهمگونی مشخصه‌های فیزیکی و فردی کشاورزان در مصرف آب زیرزمینی در محدوده اصفهان-برخوار می‌پردازد. لازم به ذکر است که در ارتباط با بهره‌برداری از یک منبع آبی، نمی‌توان تصمیمات کشاورزان را تنها متأثر از عوامل روان‌شناختی دانست، بلکه شرایط فیزیکی منطقه نیز تصمیمات عوامل کشاورز را تحت تأثیر قرار می‌دهد. بر این اساس، در این مطالعه ضمن بررسی پارامترهای فردی کشاورزان، تلاش شده است تا تأثیر تراز آب زیرزمینی در رفتار کشاورزان بررسی شود. در راستای نیل به این هدف، ابتدا یک مدل عامل‌بنیان در چارچوب نرم‌افزار Netlogo به جهت شبیه‌سازی فرآیند انتخاب الگوی کشت توسط کشاورزان توسعه یافت. شبیه‌سازی رفتار کشاورزان در این مطالعه با الهام از تئوری رفتار برنامه‌ریزی‌شده، بر اساس گزارشات اجتماعی و شناسایی فاکتورهای فردی و اقتصادی مؤثر شامل: سن، تحصیلات، تجربه کشاورزی، اعتماد به مسئولین، اهمیت پدیده فرونشست، سطح رفاه و وابستگی معیشت عوامل به کشاورزی صورت گرفته است. سپس با محاسبه میزان تمایل کشاورزان به صرفه‌جویی در مصرف آب کشاورزی، چهار گروه‌بندی رفتاری اصلی شامل کشاورزان فعال، ادراکی، تعاملی و نیمه‌ادراکی و یک گروه فرعی یعنی کشاورزان متخلف برای این عوامل در نظر گرفته شده است که هر گروه مطابق با معیارهای خاص خود به انتخاب محصول می‌پردازد. تأثیر تراز آب زیرزمینی در تصمیم‌گیری کشاورزان و تأثیر متقابل برداشت کشاورزان بر وضعیت آب‌های زیرزمینی با تلفیق مدل عامل‌بنیان و یک شبیه‌ساز توزیعی آب زیرزمینی در محیط نرم‌افزار MODFLOW محقق شده است. بنابراین، در ابتدا مدل آب زیرزمینی به طور مستقل در دو حالت ماندگار و ناماندگار صحت‌سنجی و واسنجی گردید که خطای RMSE برابر با ۱/۹۷ متر، در دوره واسنجی دقت مناسب این مدل را مشخص نمود. سپس، ایجاد اتصال دوسویه مدل عامل‌بنیان و آب زیرزمینی و صحت‌سنجی چارچوب اجتماعی-هیدرولوژیکی در محیط نرم‌افزار پایتون میسر گردید. بدین ترتیب، کالیبراسیون چارچوب پیشنهادی، با توسعه یک مدل بهینه‌سازی در چارچوب الگوریتم ژنتیک با هدف حداقل‌سازی اختلاف بین تراز آب زیرزمینی مشاهداتی و محاسباتی و تعریف ضرایب اجتماعی و ضریب آب برگشتی به‌عنوان متغیرهای تصمیم انجام گرفته است. بررسی نتایج تراز آب زیرزمینی و سطح کشت شبیه‌سازی‌شده در چارچوب توسعه‌یافته دقت مدل مورد بررسی را مشخص کرده است. با حصول اطمینان از صحت مدل پیشنهادی، نتایج چهار سناریوی مدیریتی در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفت. در ابتدا، در سناریوی اجتماعی تأثیر حداکثر بودن مقدار پارامترهای تجربه کشاورزی، اعتماد به مسئولین و درک عواقب فرونشست مورد مطالعه قرار گرفت؛ نتایج این سناریو حاکی از آن است که بهبود فاکتورهای روان‌شناسی تفاوت‌چندانی در تراز آب زیرزمینی نسبت به شرایط تاریخی آبخوان اصفهان-برخوار ایجاد نکرد و تنها سود کشاورزان حدود ۴ درصد کاسته شد. سپس، اجرای سناریوی افزایش قیمت محصولات کم‌آب بر شامل گندم، جو و ذرت، با افزایش چشمگیر سطح زیر کشت گندم نسبت به شرایط بدون سناریو بهبود ۱/۰۵ متری تراز آب زیرزمینی در شهریور ۱۳۹۸ به‌عنوان آخرین گام زمانی را نتیجه داد؛ ضمن اینکه سود کشاورزان در این سناریو بهبود ۸۸ درصدی را نشان داده است. در ادامه، اجرای سناریوی اعمال جریمه برای محصولات پرآب بر به‌عنوان عامل بازدارنده برای کشاورزان باعث کاهش کشت محصولات پرآب بر و بهبود ۵۳ سانتی‌متری تراز آب میانگین شده، ضمن اینکه بر خلاف انتظار سود کشاورزان نیز کمتر از ۱ درصد نسبت به شرایط تاریخی کاهش داشته است. در نهایت، نتایج سناریوی بازار آب به‌عنوان آخرین سناریو، مشخص کرد که با اجرای این سازوکار در محدوده اصفهان-برخوار تراز آب زیرزمینی تا ۱/۶۶ متر در آخرین گام زمانی بهبود یافته است. به‌علاوه، سود کشاورزان نیز نسبت به دوره تاریخی در آخرین سال شبیه‌سازی ۱۴ درصد افزایش یافت.

**کلمات کلیدی:** سیستم پیچیده تطبیقی، سیستم اجتماعی-هیدرولوژیکی، مدل عامل‌بنیان-آب زیرزمینی، NetLogo، MODFLOW

## فصل اول

### مقدمه

#### ۱-۱- پیشگفتار

در دنیای امروز توسعه‌های اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی همگی در گروی بهره‌برداری از آب به‌عنوان یک منبع مشترک هستند. این در حالی است که شرایط تغییر اقلیم، رشد سریع جمعیت و فعالیت‌های تنش‌زای انسانی منجر به کمبود شدید آب، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک دنیا شده است و پیش‌بینی می‌شود که تا سال ۲۰۲۵ جمع‌کثیری از انسان‌ها بحران تنش آبی را تجربه خواهند کرد. در میان مصرف‌کنندگان آب، بخش کشاورزی با تخمین میزان مصرف حدود ۷۰ درصد از کل تقاضا، بزرگ‌ترین مصرف‌کننده آب محسوب می‌شود. بدین ترتیب، کشاورزی یکی از مستعدترین بخش‌ها در رویارویی با کمبود آب خواهد بود؛ چراکه با ادامه روند رشد جمعیت در شرایط فعلی و با وجود تنش آبی، انتظار می‌رود تا با مدیریت پایدار منابع آب کشاورزی میزان آب کمتری مصرف شود، بدون اینکه امنیت غذایی افراد حاضر در جوامع، در معرض خطر قرار گیرد [۱].

بر اساس موارد ذکر شده، اتخاذ استراتژی‌هایی در راستای مدیریت منابع آب زیرزمینی بر اساس درک ساده‌ای از ارزش‌ها و رفتار ذی‌نفعان، ممکن است در مرحله اجرا نتایج رضایت‌بخشی را در پی نداشته باشد؛ زیرا این تصمیمات توسط گروه بزرگی از ذی‌نفعان تحت تأثیر قرار می‌گیرند که از یک منبع مشترک استفاده می‌کنند. بنابراین، سیستم‌های آبی به‌عنوان سیستم‌های پیچیده‌ای<sup>۱</sup> در نظر گرفته می‌شوند که رفتار ذی‌نفعان در مقیاس فردی می‌تواند، موجب نتایج

---

<sup>۱</sup> Complex System

غیرقابل پیش‌بینی در عملکرد آن شود. به عبارت دیگر، در این سیستم‌ها نه تنها بازخورد رفتاری مصرف‌کنندگان می‌تواند نتایج مورد انتظار استراتژی‌های مدیریتی را تغییر دهد، بلکه بیم آن می‌رود که تصمیمات طراحی شده و استراتژی‌های تجویزی در مدیریت متمرکز نیز آن‌گونه که انتظار می‌رود عمل نکنند. در نتیجه، از آنجا که ابعاد اجتماعی می‌تواند نقش بسیار مهمی در تصمیمات مصرفی کشاورزان ایفا کند، می‌بایست در رویکردهای امروزی مدیریت منابع آب زیرزمینی لحاظ گردد [۲].

### ۱-۲- تبیین مسئله و ضرورت پژوهش

امروزه انسان با دخالت‌های مستقیم مانند استخراج بی‌رویه آب‌های زیرزمینی، تغییر جریان‌های بازگشتی به آبخوان‌ها و یا با دخالت‌های غیرمستقیم نظیر تغییر کاربری اراضی، احداث سدها و ایجاد تغییر اقلیم‌های انسان‌ساز<sup>۱</sup>، چرخه‌های طبیعی هیدرولوژیکی را دست‌خوش تغییر کرده است [۳]؛ به طوری که شواهد نشان می‌دهد که جوامع در حال گذر به دوره انتروپسین<sup>۲</sup>، دوره‌ای که انسان‌ها عاملان اصلی تغییرات در شرایط اکولوژیکی و محیط‌زیستی هستند، می‌باشند [۴]. بنابراین نقش عوامل انسانی به‌عنوان یکی از اجزای اصلی سیستم‌های طبیعی غیرقابل‌انکار است. از طرفی روند کنونی تغییر اقلیم، افزایش جمعیت در ترکیب با شیوع خشکسالی‌های اخیر و تمایلات سیاسی برای دستیابی به خودکفایی در تولید محصولات غذایی خاص منجر به استخراج بیش از حد از آب‌های زیرزمینی به‌ویژه در بخش کشاورزی شده است. به نحوی که مدیریت پایدار منابع آبی در بخش کشاورزی را به یکی از معضلات اصلی و چالش‌برانگیز در منطقه خشک و نیمه‌خشکی همچون ایران مبدل ساخته است. با این وجود، سیاست‌گذاری‌های دولتی به‌منظور مدیریت پایدار آب کشاورزی اغلب بر پایه بهبود عرضه آب بوده است؛ به این دلیل که دسترسی به آب از مهم‌ترین فاکتورهای توسعه کشاورزی در شرایط محدودیت منابع آبی به‌شمار می‌رود. در راستای تحقق این هدف، در سال‌های اخیر، پروژه‌های انتقال آب و یا احداث سدها به‌شکل قابل توجهی دنبال شده است و نسبت به سایر رویکردهای حفاظت آب به‌خصوص حفاظت منابع آب زیرزمینی سهل‌انگاری اتفاق افتاده است [۵]. در این خصوص، با توجه به ماهیت آب‌های زیرزمینی به‌عنوان منابع مشترک، فقدان رویکردهای حفاظتی کارآمد برای جلوگیری از برداشت بی‌رویه آب توسط کاربران، فقدان قوانین مالکیتی مناسب و دسترسی نامحدود برای افزایش سود فردی، منجر به افزایش بهره‌برداری و کاهش سرانه این منابع شده است که در نهایت تراژدی منابع مشترک<sup>۳</sup> را موجب خواهد شد [۶]. در نتیجه، به‌کارگیری رویکردهای مدیریت تقاضا در راستای ترغیب مصرف‌کنندگان به تغییر رفتار مصرف‌آب، راه‌حل‌های پایدارتری را در زمینه‌های اقتصادی، اجتماعی و محیط‌زیستی به‌ارمغان خواهد آورد [۷].

از ابزارهای مرسوم در مدیریت منابع آب زیرزمینی، ابزارهای مدل‌سازی متمرکز<sup>۴</sup> (بالا به پایین<sup>۵</sup>) را می‌توان نام برد. در مدل‌های متمرکز تلاش بر آن است که یک مشکل پیچیده در قالب قوانین علت و معلولی تا حد امکان فشرده و

<sup>1</sup> Anthropogenic Climate Change

<sup>2</sup> Anthropocene

<sup>3</sup> Tragedy Of Commons

<sup>4</sup> Centralized Modeling

<sup>5</sup> Top-Down

ساده‌سازی شود. تاکنون مدل‌های متمرکز متعددی مانند: ابزارهای شبیه‌سازی-بهبینه‌سازی<sup>۱</sup>، الگوریتم‌های تکاملی<sup>۲</sup>، مدل‌های اقتصادسنجی<sup>۳</sup> و تئوری بازی‌ها<sup>۴</sup> در مدیریت منابع آب به کار گرفته شده‌اند [۸]. این نوع مدل‌سازی‌ها بیشتر بر یک وضعیت تعادلی مانند نقاط بهینه کلی یا تعادل نش<sup>۵</sup> تمرکز دارند و یک فرآیند اجتماعی را به‌طور تجمعی توصیف می‌کنند که در آن‌ها تمامی عوامل به‌صورت واحد عمل خواهند کرد. به‌عبارت‌دیگر، در مدل‌سازی متمرکز فرض بر آن است که تمامی عوامل حاضر کاملاً منطقی و بهینه عمل می‌کنند. چنین فرضی در مدل‌سازی ممکن است ناهمگونی در ویژگی‌ها و ماهیت تصادفی بودن<sup>۶</sup> تصمیمات افراد را نادیده بگیرد که دست‌کم گرفتن پیچیدگی‌های سیستم در دنیای واقعی را در پی خواهد داشت [۹]. در مقابل، سیستم‌های آبی به‌عنوان سیستم‌های پیچیده‌ای تلقی می‌شوند که تنوع و ناهمگونی در رفتار ذی‌نفعان به‌عنوان یکی از مشخصه‌های اصلی سیستم می‌تواند موجب تغییر عملکرد مورد انتظار از برنامه‌ریزی‌های صورت گرفته شود. در نتیجه، در راستای بهبود تحقق سیاست‌گذاری‌ها در حوزه مدیریت تقاضا، شاخه جدیدی از مدل‌سازی بر پایه سیستم‌های جفت‌شده انسان و طبیعت موسوم به سیستم‌های CHANS<sup>۷</sup> به‌منظور ارزیابی یکپارچه سیستم‌های انسانی و محیط‌زیستی توسعه یافته است [۴].

به‌طورخاص در مدیریت منابع آب زیرزمینی، چارچوب مدل‌های اجتماعی-هیدرولوژیکی<sup>۸</sup> برای مطالعه زیرشاخه‌ای از سیستم‌های طبیعی-انسانی و بررسی یکپارچه منابع آب موجود و اجزای انسانی حاضر در محیط به کار گرفته شده‌اند. با تکیه بر این دیدگاه، باور رایج این است که گره‌گشائی از پویائی و پیچیدگی‌های این سیستم‌ها می‌تواند به ایجاد استراتژی‌های قابل‌اعتماد برای مدیریت آب‌های زیرزمینی کمک کند. بنابراین رویکردهای مدل‌سازی پائین‌به‌بالا<sup>۹</sup> با تمرکز بر روابط زیرسیستم‌ها، در مجموع سیستم‌های پیچیده‌تری را تشکیل خواهند داد و نتایج درست‌تری را با حضور عوامل پویا مانند عوامل انسانی در مدل‌های هیدرولوژیکی-اجتماعی ارائه خواهند کرد [۱۰].

یکی از رایج‌ترین روش‌های مدل‌سازی غیرمتمرکز<sup>۱۰</sup>، مدل‌سازی عامل‌بنیان<sup>۱۱</sup> است که در بسیاری از مطالعات برای شبیه‌سازی سیستم‌های آب-انسان به کار گرفته شده است؛ زیرا قادر به شبیه‌سازی تعاملات پیچیده و بازخوردهای بین ذی‌نفعان آب‌های زیرزمینی می‌باشد. مدل‌های عامل‌بنیان در واقع با تعریف عوامل ناهمگون<sup>۱۲</sup>، تطابق‌پذیر و خودمختار<sup>۱۳</sup> که توانائی تغییر شرایط محیط اطراف خود را دارند مدل‌سازی می‌شوند [۱۱]. این رویکرد از مدل‌سازی غیرمتمرکز تاکنون به‌طور گسترده‌ای برای مطالعه رفتار مصرفی انواع مختلفی از کاربران منابع آب در سیستم‌های هیدرولوژیکی-اجتماعی مانند: ذی‌نفعان حوضه رودخانه، مصرف‌کنندگان خانگی و کشاورزان به کار رفته و کارائی خود را در مطالعه تعاملات میان انسان و محیط‌زیست نشان داده است. هرچند استفاده از مدل‌های عامل‌بنیان همواره با

<sup>1</sup> Simulation-Optimization

<sup>2</sup> Evolutionary Algorithms

<sup>3</sup> Econometric Models

<sup>4</sup> Game Theory

<sup>5</sup> Nash Equilibrium

<sup>6</sup> Stochasticity

<sup>7</sup> Coupled Human & Natural Systems

<sup>8</sup> Socio-Hydrology

<sup>9</sup> Bottom-Up

<sup>10</sup> Decentralized Modeling

<sup>11</sup> Agent-Based Modeling

<sup>12</sup> Heterogeneous

<sup>13</sup> Autonomous

چالش‌هایی از جمله صحت‌سنجی<sup>۱</sup> و اعتبارسنجی<sup>۲</sup> مدل، به دلیل کمبود اطلاعات و نحوه تعریف کردن رفتار عامل‌ها روبرو بوده است [۱۲]؛ اما باین وجود، تاکنون فرآیند تصمیم‌گیری عوامل انسانی در مدل‌های عامل‌بنیان به کمک مدل‌های میکرواقتصادی<sup>۳</sup>، مدل‌های روان‌شناسی، مدل‌های روان‌شناختی<sup>۴</sup>، مدل‌های مبتنی بر تجربه، قوانین فرضی یا کالیبره‌محور شبیه‌سازی شده‌اند [۱۳].

این پژوهش، به بررسی محدوده مطالعاتی اصفهان-برخوار، یکی از دشت‌های حوضه آبریز زاینده‌رود، می‌پردازد که ظهور پدیده‌هایی چون فرونشست در آن حاکی از وخامت شرایط ایجادشده به دلیل برداشت‌های بی‌رویه و عدم تعادل میان میزان جریان‌های ورودی به آبخوان و برداشت‌های آب زیرزمینی است. افزایش جمعیت و ظهور صنایع پرمصرفی نظیر صنایع ساختمانی و فولاد و نیز گسترش روزافزون آن‌ها برهانی بر لزوم مطالعه و برنامه‌ریزی در این منطقه می‌باشد. بر اساس گزارشات بیلان محدوده، باتوجه به اختصاص حدود ۶۳۷/۲ میلیون مترمکعب از آبخوان به بخش کشاورزی، مدیریت آب در این بخش از اولویت بالائی برخوردار است. از طرفی باتوجه به مطالب بیان‌شده، بدیهی است که مدیریت منابع آب زیرزمینی در بخش کشاورزی در پیوستگی کامل با شناخت الگوهای رفتاری و تمایلات کشاورزان به عنوان عوامل انسانی، در تعامل با منابع آب زیرزمینی می‌باشد. در همین راستا تحقیق حاضر با شبیه‌سازی فرآیند تصمیم‌گیری کشاورزان آبخوان برخوار در انتخاب الگوی کشت و در نظرگیری تفاوت‌های فردی و اجتماعی آن‌ها در چارچوب یک مدل اجتماعی-هیدرولوژیکی سعی دارد تا با استفاده از یک مدل غیرمتمرکز به تبیین و استخراج سیاست‌های کارآمد در مدیریت آب کشاورزی دست یابد. برای بهبود عملکرد مدل‌های مرسوم هیدرولوژیکی-اجتماعی، در پژوهش پیش‌رو از مدل توزیعی<sup>۵</sup> شبیه‌سازی آب زیرزمینی در ترکیب با یک مدل عامل‌بنیان استفاده شده است.

### ۱-۳- اهداف و نوآوری‌های پژوهش

هدف از انجام پژوهش حاضر، شبیه‌سازی نحوه تصمیم‌گیری کشاورزان در شرایط کم‌آبی به عنوان عوامل شناسائی شده در محدوده اصفهان-برخوار در فرآیند انتخاب الگوی کشت، با در نظر گرفتن تفاوت‌های فردی و اجتماعی است. در چارچوب مذکور به جهت در نظر گرفتن بازخورد رفتار مصرفی کشاورزان، مدل شبیه‌ساز توزیعی آب زیرزمینی نیز توسعه داده شده است تا نتایج رویکردهای اتخاذی بر وضعیت آبخوان مورد مطالعه قرار گیرد. از طرفی، باتوجه به استفاده از مدل اجتماعی-روان‌شناختی در پژوهش، میزان تأثیر‌گذاری عوامل مختلف اجتماعی و فردی در فرآیند تصمیم‌گیری کشاورزان مورد بررسی قرار گرفته تا بتوان سیاست‌گذاری‌های آینده را مطابق با ویژگی‌های فرهنگی و اجتماعی منطقه

<sup>1</sup> Verification

<sup>2</sup> Validation

<sup>3</sup> Microeconomic

<sup>4</sup> Psychosocial and Cognitive

Models

<sup>5</sup> Distributed

توسعه داد. فرآیند تصمیم‌گیری عوامل در این پژوهش بر پایه تئوری رفتار برنامه‌ریزی شده<sup>۱</sup> و در چارچوب مدل‌سازی عامل‌بنیان شبیه‌سازی شده است.

همانطور که پیش‌تر نیز اشاره شد، تاکنون تلاش‌های زیادی در توسعه مدل‌های کارآمد طبیعت-انسان انجام گرفته است. مدل‌های آب‌زیرزمینی-عامل‌بنیان<sup>۲</sup> به‌عنوان زیرمجموعه‌ای از مدل‌های CHANS که نحوه تعامل عوامل حاضر در یک سیستم منابع آبی را با محیط اطراف بیان می‌کنند، ابتدا با استفاده از مدل‌های توده‌ای<sup>۳</sup> توسعه می‌یافتند؛ درحالی‌که امروزه با توسعه کدهای کامپیوتری و افزایش کیفیت داده‌ها، ابزارهای در دسترس برای مدل‌سازی از نظر بعد مکانی و زمانی بهبود یافتند [۸]. بدین ترتیب، در مطالعه پیش‌رو برای اولین بار با استفاده از کتابخانه‌های توسعه‌یافته و به‌کارگیری یک زبان برنامه‌نویسی واسطه، یک مدل توزیعی برای پیش‌بینی الگوهای تصمیم‌گیری کشاورزان محدوده مطالعاتی، در انتخاب الگوی کشت و در چارچوب یک سیستم اجتماعی-هیدرولوژیکی به کار گرفته شده است؛ بنابراین، اتصال مستقیم مدل شبیه‌ساز آب‌زیرزمینی به مدل عامل‌بنیان اولین نوآوری مطالعه حاضر است.

با تحقق اتصال دو زیرمدل هیدرولوژیکی و اجتماعی در این تحقیق، به‌منظور وارد کردن پویائی‌های سیستم طبیعی-انسانی و ارزیابی تأثیر تغییرات تراز آبخوان بر رفتار کشاورزان، وضعیت آب‌های زیرزمینی نیز به‌عنوان یکی از متغیرهای تأثیرگذار در مدل تصمیم‌گیری در نظر گرفته شده است. با توجه به استفاده از گزارش‌های اجتماعی موجود از منطقه مورد مطالعه و اتصال مستقیم دو مدل شبیه‌ساز آب‌زیرزمینی و مدل عامل‌بنیان، برای اولین بار از الگوریتم ژنتیک<sup>۴</sup> به‌جهت کالیبراسیون<sup>۵</sup> ضرایب اجتماعی استفاده شده است که نوآوری دیگری در نحوه کالیبراسیون مدل‌های عامل‌بنیان به‌عنوان شبیه‌ساز فرآیند تصمیم‌گیری به حساب می‌آید. در واقع، در این پژوهش در یک دیدگاه نوآورانه، ضرایب اجتماعی موجود در معادله ساختاری با بهره‌گیری از یک الگوریتم فراابتکاری مقداردهی می‌شوند.

#### ۱-۴- الگوریتم انجام پژوهش

گسترش روزافزون کم‌آبی در مناطق خشک و نیمه‌خشک موجب تغییرات رفتاری ذی‌نفعان و تکامل خصوصیات اجتماعی آن‌ها در طول زمان شده است. در همین راستا، سیاست‌گذاری‌های امروز بیشتر در جهت تطبیق با عوامل رفتاری و تعاملات انسانی بنیان‌گذاری می‌شوند. در پژوهش پیش‌رو سعی بر آن است تا مراتب تحقیقاتی لازم برای استخراج سیاست‌گذاری‌های مطابق با مشارکت و پذیرش اجتماعی در منطقه مورد مطالعه بررسی شود.

در این پژوهش در ابتدا، اطلاعات هیدرولوژیکی و زمین‌شناسی منطقه مورد نظر شامل: میزان تخلیه و تغذیه، سطح سنگ‌بستر، مقادیر هدایت هیدرولیکی و ضریب آبدهی ویژه جمع‌آوری گردیده است. سپس با جمع‌آوری اطلاعات لازم، مدل شبیه‌ساز وضعیت آب‌زیرزمینی آبخوان در نرم‌افزار MODFLOW برای یک دوره با ۱۰۸ گام زمانی ماهانه

<sup>1</sup> Theory of Planned Behavior (TPB)

<sup>2</sup> Groundwater-Agent Based Model (GW-ABM)

<sup>3</sup> Lumped aquifer models

<sup>4</sup> Genetic Algorithm (GA)

<sup>5</sup> Calibration



(۱۳۹۸-۱۳۹۰) توسعه می‌یابد؛ چراکه مدل آب زیرزمینی در بررسی عملکرد سناریوهای پیشنهادی در بهبود وضعیت آبخوان کمک‌کننده خواهد بود. در گام بعدی عوامل اجتماعی مؤثر بر فرآیند تصمیم‌گیری کشاورزان و الگوهای اجتماعی حاضر در منطقه به جهت ایجاد مدل اجتماعی بر اساس گزارش‌های اجتماعی موجود و تحقیقات پیشین انجام شده، استخراج می‌شود. در مرحله بعد بر اساس عوامل اجتماعی شناسایی شده و تئوری رفتار برنامه‌ریزی شده، فرآیند تصمیم‌گیری کشاورزان در مدل عامل‌بنیان، در محیط نرم‌افزار NetLogo شبیه‌سازی شده است. به منظور ایجاد مدل جفت‌شده اجتماعی-هیدرولوژیکی، در این گام از پژوهش با بهره‌گیری از دو کتابخانه Pynetlogo و Flopy در یک زبان برنامه‌نویسی شیء‌گرا<sup>۱</sup> به نام پایتون<sup>۲</sup>، اتصال مستقیم بین مدل اجتماعی و مدل آب زیرزمینی صورت می‌گیرد. در این اتصال با استفاده از کدهای کامپیوتری در زبان برنامه‌نویسی پایتون، با هربار اجرای مدل اجتماعی و تصمیم‌گیری کشاورزان میزان تخلیه از چاه‌ها به نرم‌افزار مادفلو منتقل می‌شود تا تغییرات سطح آب زیرزمینی مورد بررسی قرار گیرد؛ سپس تغییرات سطح آب زیرزمینی در مدل عامل‌بنیان به عنوان یک متغیر پویا تعریف می‌گردد تا در فرآیند تصمیم‌گیری در گام زمانی بعدی در نظر گرفته شود. سپس، ضرایب اجتماعی و ضریب آب برگشتی در مدل عامل‌بنیان با استفاده از یک الگوریتم بهینه‌سازی تکاملی یعنی الگوریتم ژنتیک با هدف کمینه کردن اختلاف تراز آب مشاهداتی و محاسباتی مشخص می‌گردد.

در نهایت، تلاش می‌شود تا با تغییر شرایط حاکم بر محدوده مطالعاتی در قالب سناریوهای مدیریتی، تغییرات نتایج نهائی مدل توسعه یافته تحلیل گردد. بنابراین، فرضیات و محدودیت‌های هر یک از سناریوهای موردنظر با الهام از شرایط اجتماعی، اقتصادی، ساختار فرهنگی منطقه و پارامترهای مؤثر بر تغییر رفتار عوامل، در مطالعه در نظر گرفته می‌شود تا بتوان مشخص کرد که نحوه تأثیرگذاری هر سیاست به چه نحوی ارزیابی می‌شود و تا چه حد می‌توان شرایط نهائی منطقه را بهبود بخشید.

#### ۱-۵- ملاحظه‌ها و فرض‌های پژوهش

باتوجه به رویکردهای مدل‌سازی به کارگرفته شده، کمبود اطلاعات و داده‌ها و پیشگیری از پیچیدگی مدل‌های محاسباتی، فرضیاتی در فرآیند مدل‌سازی این تحقیق در نظر گرفته شد که مهم‌ترین آن‌ها عبارتند از:

- ۱) عوامل شبیه‌سازی شده در مدل عامل‌بنیان تنها کشاورزان زراعی را شامل می‌شود؛ بدین سبب، سایر مصارف شامل: باغداری، صنعت، شرب و خدمات به دلیل اولویت تخصیص آب، از فرآیند تصمیم‌گیری کنار گذاشته شده‌اند و در واقع، فرض بر این است که نیاز آبی این مصارف به طور کامل تأمین می‌شود.
- ۲) تعداد کل چاه‌های بهره‌برداری که نماینده آن‌ها به عنوان عوامل در مدل تعریف می‌شوند برابر با ۳۰۳۷ است. از کل این چاه‌ها، تعداد بهره‌برداران کشاورزی از نوع زراعی براساس تعداد چاه‌ها با نوع کاربری کشاورزی

<sup>۱</sup> Object-Oriented language

<sup>۲</sup> Python

برابر با ۱۷۲۴ عامل تعیین شد که از لحاظ رفتاری در مدل مورد بررسی قرار می‌گیرند و تنها کاربرانی که از چاه‌های مجاز استفاده می‌کنند را در بر می‌گیرد.

- (۳) در چاه‌های با بیش از یک بهره‌بردار، یک کشاورز به‌عنوان نماینده عوامل تصمیم‌گیرنده تعیین شد.
- (۴) با توجه به لزوم وجود اطلاعات کامل از چاه‌های بهره‌برداری و مشاهداتی منطقه، گزارش بیان آبخوان مورد بررسی، اطلاعات مرتبط با هزینه‌های کشاورزی و قیمت محصولات در طی سال‌های شبیه‌سازی، سال‌های ۱۳۸۹-۹۰ تا ۱۳۹۷-۹۸ به‌عنوان دوره مدل‌سازی لحاظ شد.
- (۵) تغییر الگوی کشت در چارچوب ارائه‌شده که به تغییر نوع محصول محدود بود، به‌صورت سالانه فرض شده و از تغییر سطح کشت صرف نظر شده است.
- (۶) عوامل اجتماعی مؤثر در فرآیند تصمیم‌گیری صرفاً بر اساس گزارش‌های اجتماعی موجود از حوضه آبریز زاینده‌رود و تحقیقات پیشین حاصل شده است.

#### ۱-۶- سازماندهی فصل‌های پایان‌نامه

پایان‌نامه حاضر در شش فصل تدوین شده است. پس از شرح مقدمه و کلیات موضوع در فصل حاضر، در فصل دوم به بررسی پیشینه تحقیق، مطالعات انجام گرفته و ابزارهای توسعه یافته در شبیه‌سازی سیستم‌های انسان-محیط زیست پرداخته خواهد شد. در فصل سوم، جزئیات مدل توسعه یافته و ابزارهای مورد استفاده در این تحقیق گزارش می‌شود. فصل چهارم حاوی شرح مفصلی از محدوده مطالعاتی و ویژگی‌های منطقه است. پس از آن، نتایج حاصل از مدل‌سازی و اجرای سناریوهای پیشنهادی بر محدوده مطالعاتی در قالب نمودارها و اشکال در فصل پنجم بررسی و تحلیل خواهد شد. در آخر، ضمن ارائه پیشنهادهایی با هدف توسعه مطالعات آتی، جمع‌بندی و خلاصه‌ای از نتیجه‌گیری‌های انجام شده ارائه می‌گردد.

## فصل دوم

### پیشینه پژوهش

#### ۲-۱- مقدمه

در راستای مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی به‌عنوان اصلی‌ترین منابع آب شیرین، تاکنون تحقیقات بسیاری انجام شده است که هر کدام رویکردهای متمایزی را اتخاذ کرده‌اند. در فرآیند بهبود کارایی مدل‌های سنتی هیدرولوژیکی، با در نظر گرفتن شرایط اکولوژی ناپایدار تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی، در نظر گرفتن اجزای انسانی با توجه به ماهیت مشترک منابع آب از اهمیت بالایی برخوردار است. دلیل اهمیت این موضوع آن است که اغلب این سیستم‌ها به یک سری از عوامل انسانی همچون کشاورزان، کاربران صنایع، کاربران تفریحی و کاربران توریستی که نیاز آبی مشخصی دارند اختصاص می‌یابند. بنابراین زمانی که شرایط کمبود آب حاکم بوده و حفاظت از آب به یک نگرانی مبرم تبدیل می‌شود، شناخت این مصرف‌کنندگان یک اصل اساسی در مدیریت صحیح و قانون‌گذاری است.

مطالعات پیشین در حوزه مدیریت پایدار سیستم‌های آبی به منظور گنجاندن اجزای انسانی حاضر در سیستم، رویکردهای متنوعی را اتخاذ کرده‌اند. در این میان، بر اساس یک دسته‌بندی کلی می‌توان دو رویکرد مدل‌سازی متمرکز<sup>۱</sup> (بالا به پائین) و غیرمتمرکز<sup>۲</sup> (پائین به بالا) را نام برد. از طرفی، نحوه در نظر گرفتن ناهمگونی مشخصه‌های عوامل در بعد مکانی، در رویکردهای موجود را نیز می‌توان به دو دسته توزیعی<sup>۳</sup> و توده‌ای<sup>۴</sup> تقسیم‌بندی کرد که بیشتر بر اساس

<sup>۱</sup> Centralized

<sup>۲</sup> Decentralized

<sup>۳</sup> Distributed

<sup>۴</sup> Lumped

هدف پژوهش مشخص می‌شود. به این ترتیب، پیش از پرداختن به نحوه مدل‌سازی در این پژوهش، با بررسی نقاط ضعف و قوت مطالعات پیشین و نیز کاربرد هر رویکرد در پیشینه مدل‌های انسان-آب، بر راهکارهای موجود برای بهبود روش‌های مرسوم تأکید می‌شود.

در این فصل ابتدا تاریخچه و روند توسعه سیستم‌های اجتماعی-هیدرولوژیکی به عنوان زیرشاخه‌ای از سیستم‌های به هم پیوسته انسان-محیط‌زیست به منظور مطالعه اجزای انسانی در سیستم هیدرولوژیکی و همچنین، کاربرد دو رویکرد اصلی متمرکز و غیرمتمرکز در مدل‌سازی این سیستم‌ها به صورت مجزا بررسی می‌گردد. پس از آن به مطالعه کاربرد مدل‌های عامل بنیان<sup>۱</sup> به عنوان یک رویکرد غیرمتمرکز در مدیریت آب‌های کشاورزی، شهری و سایر کاربری‌ها پرداخته می‌شود. با توجه به کاربرد گسترده نظریه‌های روان‌شناسی در مطالعه رفتار عوامل در سیستم‌های عامل بنیان، در ادامه پیشینه‌ای از روش‌های رایج در شبیه‌سازی تصمیم‌گیری عوامل انسانی ارائه خواهد شد. در نهایت با تأکید بر چالش‌های پیش‌رو، جنبه‌های نوآوری این تحقیق و روند بهبود مدل‌های مدیریتی آب کشاورزی، مطالب ذکر شده به شکل جمع‌بندی ارائه خواهد شد.

## ۲-۲- سیستم‌های جفت‌شده انسان و طبیعت<sup>۲</sup> (CHANS)

باتوجه به دوره کنونی موسوم به دوره آنتروپوسین، تلاش‌های بسیاری در راستای معرفی انسان به عنوان عاملی که به طور مستقیم و غیرمستقیم چرخه‌های طبیعی محیط‌زیست را دستخوش تغییر می‌کند، صورت گرفته است. شناخت اجزای انسانی در توسعه مدل‌های یادشده، از تازه‌ترین تلاش محققان است که هنوز در مراحل ابتدائی رشد خود قرار دارد. با وجود پیشرفت‌های حاصل شده در شبیه‌سازی عوامل انسانی و به کارگیری ابزارهای مدرن در توسعه مدل‌های یکپارچه محیط‌زیستی، هنوز اقدامات چالش برانگیزتری نیاز است تا رفتارها و اثرات انسانی به درستی نشان داده شود [۱۳، ۱۴]. در این راستا، محققان با ارائه سیستم‌هایی که عوامل انسانی را به جای شرایط مرزی، به عنوان اجزای پویا و در تعامل با محیط‌زیست در نظر می‌گیرند، در راستای کاربردی‌تر کردن مدل‌های مرسوم زیست‌محیطی گام برداشته‌اند [۱۵].

در این زمینه، لیو<sup>۳</sup> در سال ۲۰۰۷ برای اولین بار ایده مدل‌های جفت‌شده انسان و محیط‌زیست را مطرح کرد. بر مبنای اظهارات او، مطالعه یکپارچه سیستم‌های انسانی-طبیعی در قیاس با استفاده جداگانه از علوم طبیعی یا اجتماعی، الگوهای جدید و پیچیده‌ای را فاش می‌کند که توصیف آن‌ها به طور مستقل امکان‌پذیر نیست. بدین ترتیب، لیو با بررسی ترکیبی از شش مطالعه موردی از سراسر جهان اذعان کرد که جفت کردن دو سیستم انسانی و طبیعی در واحدهای زمانی، مکانی و سازمانی اهمیت بسزائی در مطالعه دقیق سیستم‌های محیط‌زیستی دارد؛ او همچنین مفاهیمی مانند: پویائی غیرخطی<sup>۴</sup>، آستانه‌ها<sup>۵</sup>، لوپ‌های بازخوردی متقابل<sup>۶</sup>، تأخیرات زمانی<sup>۷</sup>، برگشت‌پذیری<sup>۸</sup>، ناهمگونی<sup>۹</sup> و غافلگیری‌ها<sup>۱۰</sup> را

<sup>1</sup> Agent-Based Modeling (Abm)

<sup>2</sup> Chans

<sup>3</sup> Liu

<sup>4</sup> Nonlinear Dynamics

<sup>5</sup> Thresholds

<sup>6</sup> Reciprocal Effects & Feedback

Loops

<sup>7</sup> Time Lags

<sup>8</sup> Resilience

<sup>9</sup> Heterogeneity

<sup>10</sup> Surprises

برای هر حوضه به عنوان نمونه مطالعاتی، به طور جداگانه تعریف کرد [۱۵، ۱۶]. در واقع، رویکرد CHANS در این مفهوم بر اساس تحقیقات پیشین بر پایه تعاملات انسان-طبیعت<sup>۱</sup> ساخته شده و به دنبال درک پیچیدگی های سیستم از طریق ادغام دانش زیرسیستم های سازنده و تعاملات آنها است. از منظر عملی، این امر شامل پیوند دادن مدل های فرعی توسعه یافته شامل مدل های محیط زیستی، هیدرولوژیکی، اقتصادی و اجتماعی به منظور ایجاد مدل های جفت شده است که قادر به نمایش اثرات زیرسیستم ها بر یکدیگر و تعاملات بین آنها می باشد [۱۶].

واضح است که ارزیابی اثرات انسان ها بر سیستم های منابع آبی و محیط زیستی مشروط به شبیه سازی و مدل سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی حاکم بر حوضه مورد بررسی است. دلیل این امر آن است که بدین طریق می توان نتایج حاصل از اجرای استراتژی های تصمیم گیرندگان و سناریوهای مختلف در یک چارچوب دقیق را مورد آزمون قرار داد. به طور خاص، شبیه سازی جریان های آب زیرزمینی که در این مطالعه دنبال شده است، تاکنون پیشرفت های چشمگیری داشته و به توسعه مدل های توزیعی و نیمه توزیعی متنوعی منجر شده است. در دسترس بودن سیستم های کامپیوتری قدرتمند، سیستم های مدل سازی کاربر دوست<sup>۲</sup> و استفاده از نرم افزار GIS<sup>۳</sup> رشد روزافزون مدل سازی آب های زیرزمینی را در پی داشته است [۱۷]. با سرعت زیاد در روند بهبود قدرت های محاسباتی و دسترسی وسیع به نرم افزارها و رایانه ها، مدل سازی آب زیرزمینی به ابزار استاندارد برای هیدرولوژیست ها به منظور اجرای وظایفشان مبدل شده است. تا به حال، در موارد متعددی از مدل های آب زیرزمینی بهره برده شده است؛ در واقع از این مدل ها می توان به عنوان: ۱. ابزار تحلیلی به منظور بررسی پویایی سیستم های آب زیرزمینی و شناخت الگوی های جریان؛ ۲. ابزار شبیه سازی به منظور تحلیل پاسخ های سیستم آب زیرزمینی به تنش ها؛ ۳. ابزار ارزیابی فرآیندهای تغذیه، تخلیه، ذخیره آبخوان و کمی سازی عملکرد پایداری حوضه؛ ۴. ابزار پیش بینی شرایط آینده یا اثرات فعالیت های انسانی؛ ۵. ابزار پشتیبان برای برنامه ریزی و جمع آوری داده های میدانی و طراحی راه حل های عملی؛ ۶. ابزار آزمایش و ارزیابی سناریوهای توسعه آب های زیرزمینی؛ ۷. ابزار ارزیابی سیاست های مدیریتی و ۸. ابزارهای تجسمی برای انتقال پیام های کلیدی به مردم و تصمیم گیرندگان به کار گرفته شده اند [۱۷].

با این وجود، مدل های هیدرولوژیکی سنتی بیشتر روی فرآیندهایی تمرکز می کنند که در مکان هایی با شرایط ایده آل اتفاق می افتند؛ این در حالی است که موارد استثنائی هم در دنیای واقعی وجود دارد و تقریباً تمامی ماهیت های آبی توسط انسان ها تحت تأثیر قرار گرفته اند. بنابراین، یک نیاز فوری وجود دارد که مدل های هیدرولوژیکی تکامل یابند و با چالش های عملی و علمی نوظهور مقابله کنند [۱۰]. در نتیجه، با ارائه سیستم های تلفیقی انسان-طبیعت لازم است تا مدل های مرسوم هیدرولوژیکی که عوامل انسانی و فعالیت های انسان ساز را به عنوان عوامل خارجی به صورت ایستا یا به عنوان شرایط مرزی در نظر می گرفتند، این عوامل را به عنوان بخشی از پویایی چرخه آب محسوب کنند.

<sup>1</sup> Human-Nature

<sup>2</sup> User friendly

<sup>3</sup> Geographic Information System

(GIS)

به عبارتی، یک رویکرد کلی بین رشته‌ای، راه‌حل‌های پایدارتر و مؤثرتری را برای مدیریت منابع ارائه می‌کند که در ابزارهای سنتی هیدرولوژیکی به شکل دقیق بررسی نشده‌اند [۱۸]. سیستم‌های جفت‌شده انسان-طبیعت که در راستای تکمیل و بهبود مدل‌های سنتی هیدرولوژیکی ارائه شده‌اند را می‌توان به‌طور کلی دربرگیرنده زیرشاخه‌هایی شامل: سیستم‌های اجتماعی-اکولوژیکی<sup>۱</sup> [۱۹]، هیدرولوژیکی-اقتصادی<sup>۲</sup> [۲۰] و اجتماعی-هیدرولوژیکی<sup>۳</sup> [۱۰] دانست که برای مطالعه حالت‌های خاصی از سیستم CHANS توسعه یافته‌اند. در این میان، با توجه به استفاده گسترده از دو زیرشاخه هیدرولوژیکی-اقتصادی و هیدرولوژیکی-اجتماعی در مدیریت و برنامه‌ریزی منابع آب و شبیه‌سازی تعاملات منابع آبی و انسان‌ها، در ادامه به معرفی پیشینه تاریخی این دو سیستم پرداخته می‌شود.

## ۲-۱-۲-۲- سیستم‌های هیدرولوژیکی-اقتصادی

مدل‌سازی هیدرولوژیکی-اقتصادی به مفهوم توسعه مدلی با نسبت دادن ارزش‌های اقتصادی به آب است که با توجه به میزان آب در دسترس و میزان تقاضا در طول زمان و مکان، تغییر می‌کند. به عبارت دیگر، نه تنها مدل‌های آبی-اقتصادی نشان‌دهنده سیستم‌های مهندسی‌شده هیدرولوژیکی هستند، بلکه به صراحت ماهیت اقتصادی تقاضاها و هزینه‌های آب را در نظر می‌گیرند. این رویکرد، جدای از به حداقل رساندن هزینه‌ها و یا بیشینه کردن سود، چارچوبی را برای در نظر گرفتن ارزش خدمات آب در برنامه‌ریزی و بهره‌برداری از منابع فراهم می‌کند [۲۱]. تاکنون مطالعات متعددی که حداقل به چهل سال قبل باز می‌گردند، به منظور توسعه سیاست‌های کاربردی با استفاده از رویکرد هیدرولوژیکی-اقتصادی در سراسر جهان صورت گرفته است. این مطالعات مسائل متعددی نظیر: تخصیص بین بخشی رودخانه [۱۵]، تأمین آب و گسترش ظرفیت زیرساخت‌ها [۲۲]، برداشت آب‌های سطحی و زیرزمینی [۲۳]، نحوه عملکرد نهادها، بازارها و قیمت‌گذاری آب [۲۳، ۲۴]، حل تعارض و مدیریت منابع آب فرامرزی [۲۶]، مدیریت تغییرات اقلیم و خشکسالی [۲۷]، پاسخ به سیل و کیفیت آب را بررسی کرده‌اند [۲۸، ۲۹].

در واقع می‌توان ادعا کرد که برای اولین بار، در نظر گرفتن تصمیم‌ها و تعاملات عوامل انسانی در سیستم‌های هیدرولوژیکی، با استفاده از رویکرد اقتصادی-هیدرولوژیکی با فرض اینکه عوامل انسانی کاملاً عاقلانه و بر اساس تأمین سود اقتصادی عمل می‌کنند محقق شد. به طوری که، پژوهش اشراینمارچز<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۰۶) فرآیند تصمیم‌گیری عوامل را در یک مدل کاربردی اراضی بر اساس حل یک مدل بهینه‌ساز ریاضی مشخص کرد. این مقاله با ایجاد تمایز بین عوامل مختلف در بازدهی منحصر به فرد محصول، برای هر عنصر ناهمگونی عوامل را نیز در نظر گرفته است [۳۰]. مدل‌های هیدرولوژیکی-اقتصادی کاربرد خود را نه تنها در بخش کشاورزی و آبخیزداری نشان داده‌اند بلکه در بخش‌های دیگری از مدیریت منابع آب نیز مفید واقع شده‌اند. به طور مثال، سای<sup>۵</sup> (۲۰۰۸) در مطالعه خود، با استفاده از یک مدل جامع مدیریتی، مؤلفه‌های اقتصادی مصارف آب را در یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی، با هدف بیشینه کردن

<sup>1</sup> Socio-Ecological Systems  
<sup>2</sup> Hydro-Economic Systems

<sup>3</sup> Socio-Hydrology  
<sup>4</sup> Schreinemachers

<sup>5</sup> Cai

سود اقتصادی حاصل از مصرف آب در بخش‌های مختلف توسعه داد. عناصر اقتصادی در این مدل، شامل: سود حاصل از کشاورزی، آب شهری، صنعتی و تولید برق آبی، حقوق آب و روابط بازار آب برای تعیین قیمت و حجم آب معامله شده می‌باشد که در یک مدل اقتصادی بهینه‌ساز تعبیه شدند. سای در این مطالعه ضمن بررسی مشکلات موجود در مدل‌سازی جامع و یکپارچه منابع آب، با استفاده از رویکرد اقتصادی-هیدرولوژیکی به ارائه راه‌حل‌های مرتبط با این موضوع نیز پرداخته است [۲۰].

در راستای شبیه‌سازی تعاملات عوامل انسانی در سیستم‌های هیدرولوژیکی-اقتصادی، از ابزار مدل‌های عامل‌بنیان نیز در برخی مطالعات بهره گرفته شده است. همانطور که در پژوهش دیگری، زی لینگ انجی<sup>۱</sup> (۲۰۱۱) مدل عامل‌بنیانی را با رویکرد هیدرولوژیکی-اقتصادی در بخش مدیریت آب زراعی توسعه داد که در آن کشاورزان در چارچوب یک مدل بهینه‌سازی اقتصادی در پی بیشینه کردن سود نهائی حاصل از کشاورزی بودند. در این مدل‌سازی ضمن شبیه‌سازی رفتار کشاورزان، تأثیرات بازار محصولات رایج و میزان سهمیه کربن بر بار نیتراژ موجود در منابع آب نیز تحلیل گشته و این مطالعه برای یک محدوده نیمه فرضی در ایلینویز<sup>۲</sup> اعمال شده است. مدل عامل‌بنیان توسعه یافته، تعاملات بین کشاورزان در مورد فناوری‌های جدید و فرصت‌های بازار را شبیه‌سازی کرده و عدم قطعیت‌های موجود در مدل را با به کارگیری استنتاج بیزی<sup>۳</sup> بررسی می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که تأثیر گذارترین عوامل مؤثر بر تصمیمات کشاورزان، قیمت محصول، هزینه‌های تولید و بازدهی محصولات کشاورزی بوده است [۳۱].

کاربرد مدل‌های هیدرولوژیکی-اقتصادی به طور ویژه در بخش مدیریت منابع آب زیرزمینی را می‌توان در مطالعه مولیگان<sup>۴</sup> در سال ۲۰۱۴ یافت که به بررسی سیاست‌های مدیریت منابع آب زیرزمینی و تخصیص اقتصادی این منابع با توجه به محدودیت‌های برداشت از آن‌ها می‌پردازد. در این مطالعه، مدل‌های تصمیم‌گیری اقتصادی با یک مدل شبیه‌سازی آب زیرزمینی نظیر مادفلو به طور هم‌زمان کالیبره شدند و حوضه رودخانه ریپابلیکن<sup>۵</sup> که بر بخشی از آبخوان اوگالالا<sup>۶</sup> در دشت‌های مرتفع ایالات متحده قرار دارد، به عنوان مطالعه موردی استفاده شد. در این مطالعه عوامل، گروهی از کشاورزان هستند و تصمیمات آن‌ها شامل نوع محصول، مصرف آب و به طور غیرمستقیم، مساحت آبیاری می‌باشد. در این پژوهش، برای مدل بهینه‌سازی اقتصادی از دو چارچوب متمرکز مدیریت کنترل بهینه<sup>۷</sup> (OCM) و غیرمتمرکز مدیریت چندعاملی<sup>۸</sup> (MASS) استفاده شده است که در مدل متمرکز، هدف بیشینه کردن مجموع سود همه عامل‌ها و در مدل دیگر، بیشینه کردن سود هر عامل مد نظر می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که سیاست‌های یکنواخت اعمال شده زمانی که با عواملی واقعی‌تر، علاقه‌مندتر، ناهمگون‌تر و نزدیک‌بینانه‌تر شبیه‌سازی شوند عملکرد ضعیف‌تری

<sup>1</sup> Tze ling Ng

<sup>2</sup> Illinois

<sup>3</sup> Bayesian Inference (BI)

<sup>4</sup> Mulligan

<sup>5</sup> Republican

<sup>6</sup> Ogallala

<sup>7</sup> Optimal Control Model

<sup>8</sup> Multi-Agent System Simulation

خواهند داشت؛ بر این اساس، مطالعه یادشده اثرات ناهمگونی فیزیکی حوضه و عوامل، ناکارآمدی ابزارهای ارزیابی سیاست‌ها با به‌کارگیری یک مدل‌سازی ساده و تک‌بعدی را نشان می‌دهد [۳۲].

لازم به ذکر است که در مدیریت منابع مشترکی چون آب‌های زیرزمینی، مدل‌های هیدرولوژیکی-اقتصادی بستر مناسبی را برای مدیریت مشارکتی در اختیار مدیران منابع آب قرار می‌دهد تا امکان توسعه پایدار منابع آب زیرزمینی را در شرایط واقعی‌تر ارزیابی کنند. به‌طور مثال، قدیمی و همکاران (۲۰۱۹) به بررسی تأثیر درونی‌سازی آسیب‌های زیست‌محیطی بر مدیریت منابع آب زیرزمینی آبخوان نمدان واقع در استان فارس پرداختند. این پژوهش یک مدل شبیه‌سازی-بهبودسازی در قالب رویکرد هیدرولوژیکی-اقتصادی تکاملی ارائه کرده و همچنین، سناریوهای مختلف میزان همکاری و نحوه درونی‌سازی آسیب‌های زیست‌محیطی را در یک افق برنامه‌ریزی سی ساله برای منطقه مورد مطالعه مدنظر قرار داده است. در این مطالعه، الگوریتم بهبودسازی مستمر کلونی مورچه‌ها<sup>۱</sup> و برخی از روش‌های تئوری بازی‌های مشارکتی برای تخصیص سود خالص به‌دست آمده برای مدل به کار برده شده‌اند. نتایج حاکی از آن است که سناریوی همکاری کامل با درونی‌سازی آسیب‌های زیست‌محیطی، وضعیت آب‌های زیرزمینی مناطق مورد مطالعه را بهبود می‌بخشد. در سناریوی مذکور ارتفاع آب‌های زیرزمینی ۴/۸ متر افزایش یافته درحالی‌که کاهش سالانه ۱۴ میلیون مترمکعب را تجربه کرده است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که در سناریوی عدم همکاری و هر دو سناریوی همکاری جزئی، مصرف‌کنندگان آب زیرزمینی در هر منطقه به‌تنهایی تلاش می‌کنند تا حداکثر حجم آب زیرزمینی را استخراج کنند؛ در این شرایط رقابتی ممکن است که منابع آب زیرزمینی تحت فشار بیشتر قرار گرفته و مجموع سود خالص با افزایش هزینه‌های استخراج و آسیب‌های زیست‌محیطی کاهش یابد [۳۳].

عقلانیت اقتصادی دیدگاه حاکم بر رویکرد هیدرولوژیکی-اجتماعی برای فهم تصمیمات عوامل تأثیرگذار در محیط و ارزیابی سیاست‌های مدیران برای تطابق با شرایط جدید است؛ بر این اساس که افراد با هدف بیشینه کردن سود خود، به یک سری قیده‌های مانند: مساحت زمین، منابع مالی و یا میزان برداشت مقید شوند [۳۴]؛ اما بررسی شرایط در دنیای واقعی حاکی از آن است که تصمیمات بر متغیرهای اجتماعی و شناختی متکی بوده و پیچیده‌تر از آن هستند که با عقلانیت اقتصادی نشان داده شوند [۳۵، ۵]. علاوه‌براین، ابزارهای مورد استفاده در این رویکرد، شامل: مدل‌های شبیه‌سازی-بهبودسازی، الگوریتم‌های مرسوم تکاملی، مدل‌های اقتصادسنجی و تئوری بازی‌ها، تصادفی بودن فرآیندهای اجتماعی را در نظر نمی‌گیرند و بر یک وضعیت تعادلی تمرکز دارند. این درحالی‌است که مشخصه اصلی تعاملات انسان-محیط زیست پیچیدگی است و تصمیمات افراد الزاماً عاقلانه، بهینه و بر اساس توجیحات اقتصادی نمی‌باشد [۸]؛ بنابراین در تکامل مدل‌های رایج نیاز است تا خصوصیات اجتماعی عوامل مؤثر به‌طور دقیق‌تری بررسی و شبیه‌سازی

<sup>۱</sup>Continuous Ant Colony Optimization (CACO)



شوند. بر همین اساس، مدل‌های اجتماعی-هیدرولوژیکی به جهت شبیه‌سازی دخالت عوامل انسانی در سیستم هیدرولوژیکی ارائه شدند.

## ۲-۲-۲- سیستم‌های هیدرولوژیکی-اجتماعی

نزدیک کردن مدل‌های هیدرولوژیکی-اقتصادی به شرایط واقعی در مدیریت منابع آب منجر به پیدایش و ارائه سیستم‌های اجتماعی-هیدرولوژیکی شده است که به طور خاص بر تعامل بین انسان و یک سیستم هیدرولوژیکی تمرکز می‌کند [۳۶]. علی‌رغم اینکه معرفی چارچوبی منسجم و شناخت مفاهیم مورد بحث در علم نوین اجتماعی-هیدرولوژیکی، اولین بار توسط سیوآپالان<sup>۱</sup> انجام شد [۱۰]، این امر که انسان و آب به واسطه مجموعه‌ای از تعاملات متقابل مرتبط هستند؛ برای سال‌های زیادی است که شناخته شده می‌باشد [۳۷]. اگرچه به دلیل حضور فاکتورهائی مانند پیچیدگی ضمنی و عدم قطعیت در سیستم‌های جفت‌شده انسان و طبیعت، بازخوردها و تعاملات دوطرفه بین جامعه و آب، به طور رایجی در توسعه و پیش‌بینی سیاست‌ها مدل نشده‌اند. در برخی مقالات انتقادی، در توصیف مفهوم هیدرولوژی-اجتماعی به عنوان یک دانش جدید، باور بر این است که هیدرولوژی-اجتماعی یک دانش جدید نیست، بلکه این عبارت معادل‌سازی شده کلمه Hydro-Sociology است که اولین بار توسط فالن مارک<sup>۲</sup> در سال ۱۹۷۹ مطرح شد تا تعاملات انسانی آبی را مطالعه کند [۳۸]. با این وجود، سیوآپالان در ارائه دانش هیدرولوژی-اجتماعی با بررسی شرایط حکمرانی و اثرات تغییرات اجتماعی و هیدرولوژیکی در حوضه آبریز مورومبیج<sup>۳</sup> استرالیا، ادعا می‌کند که پیش‌بینی شرایط آینده حوضه بدون در نظر گرفتن تعاملات و بازخوردهای بین منابع آب و سیستم انسانی امکان‌پذیر نیست. بر مبنای تعریف او، دانش هیدرولوژی-اجتماعی، در راستای فهم پویائی‌ها و تکامل هماهنگ<sup>۴</sup> سیستم‌های جفت‌شده انسان و آب گام برمی‌دارد [۱۰]. با توجه به توضیحات ارائه‌شده توسط سیوآپالان، اهداف اصلی چارچوب اجتماعی-هیدرولوژیکی عبارتند از [۳۹]:

- (۱) بررسی الگوها و پویائی مقیاس‌های زمانی و مکانی به منظور تشخیص ویژگی‌های سیستم‌های جانبی و انسانی مورد بررسی و تعاملات بین آن‌ها؛
- (۲) توضیح و اکتشاف پاسخ‌های سیستم اجتماعی-هیدرولوژیکی به طوری که تغییرات آینده سیستم پیش‌بینی شود؛ در واقع، رویکردهای مدیریتی حال حاضر اغلب به دلیل عدم توانائی مدل‌های کنونی در پیش‌بینی منجر به مدیریت ناپایدار آب می‌شوند؛
- (۳) پیشبرد فهم سیستم‌های آبی در یک مفهوم فرهنگی، اجتماعی، اقتصادی و سیاسی در حالی که مشخصه‌های ضمنی و اهمیت وجود آن‌ها شناسائی می‌گردد.

<sup>1</sup> Sivapalan  
<sup>2</sup> Fallenmark

<sup>3</sup> Murrumbidgee  
<sup>4</sup> Co-Evolution

نحوه مدل‌سازی سیستم‌های اجتماعی-هیدرولوژیکی بر مبنای هدف پژوهش می‌تواند در چند دسته‌بندی خاص قرار بگیرد. این دسته‌بندی‌ها عبارتند از: (۱) مدل‌های بالابه‌پائین در مقابل مدل‌های پائین‌به‌بالا و مدل‌های مفهومی؛ (۲) مدل‌های داده‌محور در مقابل مدل‌های مبتنی بر فیزیک و (۳) مدل‌های توزیعی در مقابل مدل‌های توده‌ای. به‌طور خلاصه، تمایز بین مدل‌های داده‌محور و فیزیک‌محور با مدل‌های مفهومی در این است که مدل‌های مبتنی بر فیزیک از نمایش ریاضیاتی برای مشخص کردن فرآیندهای فیزیکی داخل مدل استفاده می‌کنند؛ درحالی‌که در مدل‌های داده‌محور از داده‌های موجود برای بازتولید رفتار سیستم استفاده می‌شود و مدل‌های مفهومی نیز بر اساس دیدگاه مفهومی مدل‌کننده از سیستم توسعه می‌یابند [۴۰]. انتقادات رایج در رابطه با این دو رویکرد آن است که نتایج مدل مبتنی بر فیزیک همیشه توسط داده‌های موجود پشتیبانی نمی‌شوند [۴۱] و به دلیل ماهیت همگن معادلات در یک دنیای ناهمگن، محدود هستند [۴۲]؛ درحالی‌که مدل‌های داده‌محور می‌توانند فرآیندهایی را نشان دهند که هیچ رابط مشخص فیزیکی ندارند [۴۳]. تمایز بین دو رویکرد توزیعی و توده‌ای بدین ترتیب است که مدل‌های توزیعی، ناهمگونی مکانی و زمانی را برای اجزای مدل در نظر می‌گیرند، درحالی‌که مدل‌های توده‌ای سیستم مورد بررسی را در نقاط مکانی مجزا متمرکز می‌کنند. این بدان معناست که اجزا فقط در زمان متفاوت هستند. مزایای مدل‌های توزیعی به‌ویژه در زمینه هیدرولوژیکی که ناهمگونی فضایی در آن از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد، کاملاً مشخص است. با این حال، اشکالاتی چون الزام وجود داده با وضوح و پتانسیل بالا برای عدم قطعیت و نیازهای محاسباتی بزرگ‌تر، نشان می‌دهد که مدل‌های یکپارچه نیز در بعضی موارد می‌توانند انتخاب مناسبی باشند [۴۴].

از دیگر رویکردهای متداول در شبیه‌سازی سیستم‌های هیدرولوژیکی-اجتماعی رویکردهای بالابه‌پائین یا متمرکز در مقابل رویکرد پائین‌به‌بالا یا غیرمتمرکز است. در واقع روش بالابه‌پائین به بررسی نتایج نهایی یک سیستم به‌منظور مدل‌سازی تعاملات آن می‌پردازند؛ در اصل، در جست‌وجوی ارتباطات ورودی با خروجی، یا رفتار سیستم و بالعکس هستند [۳۷]. می‌توان گفت روش‌های مرسوم در مدیریت متمرکز به‌جای تمرکز روی فرآیندهای رفتاری مدل در مقیاس فردی، یک دیدگاه بالابه‌پائین را اتخاذ می‌کند که منجر به درک رفتار کلی سیستم می‌شود. در واقع، این رویکرد بر روشی که با استفاده از آن سیستم، ورودی‌ها را به خروجی تبدیل می‌کند تمرکز دارد و از این روش برای مشخص کردن رفتار کلی سیستم استفاده می‌شود و هدف اصلی توصیف روش کار به‌جای تعیین ماهیت سیستم با بررسی اجزای آن و قوانین فیزیکی است که آن‌ها را به هم متصل می‌کند [۴۵].

لازم به ذکر است که با وجود مزیت‌های این روش، باید توجه داشت که در برخی موارد، ممکن است ماهیت سیستم در طول زمان تغییر کند، بنابراین این احتمال نیز وجود دارد که استفاده از معادلات ثابت و ساده‌سازی‌های روش متمرکز در طول زمان به‌درستی عمل نکند [۴۶]. این امر به‌طور ویژه در هیدرولوژی-اجتماعی حائز اهمیت است، چراکه هنجارها و ارزش‌های اجتماعی که نقش مهمی در این سیستم‌ها ایفا می‌کنند در طول زمان متغیر هستند. از طرفی، قطعیت

نتایج حاصل از این روش، ممکن است نتایج را از رفتارهای دنیای واقعی دور کند [۴۷]. در واقع، همان‌گونه که ساده‌سازی روابط فهم ارتباطات یک مدل را تسهیل می‌کند، فرض روابط بسیار ساده نیز در مواردی ممکن است از ارائه پیچیدگی واقعی سیستم عاجز باشد [۴۸].

به‌طور کلی روش‌های رایج در رویکردهای متمرکز از جمله سیستم دینامیک یا تئوری بازی‌ها معمولاً به دلیل عدم توانایی در تشخیص فرآیندهای سطح پایه سیستم، مورد انتقاد قرار می‌گیرند [۴۹]. در نتیجه، رویکردهای غیرمتمرکز در مسیر بهبود فرآیندهای مدل‌سازی، به جهت در نظر گیری ناهمگونی عوامل انسانی و اثرگذاری تفاوت‌های زمانی و مکانی در سیستم‌های اجتماعی-هیدرولوژیکی توسعه یافتند که در بخش بعدی به تفصیل به بررسی تاریخچه و مفاهیم مدل‌سازی غیرمتمرکز در سیستم‌های آب-انسان پرداخته می‌شود.

### ۲-۳- پیشینه مدل‌سازی غیرمتمرکز در سیستم‌های هیدرولوژیکی-اجتماعی

در حال حاضر، مدل‌سازی عامل‌بنیان به عمده‌ترین ابزار شبیه‌سازی رویکرد پائین‌به‌بالا مبدل شده که تاکنون به‌طور گسترده‌ای برای فهم پیچیدگی سیستم‌های اجتماعی-هیدرولوژیکی در بسیاری از مطالعات تئوری و تجربی استفاده شده است. مطابق با پژوهش فارمر و فولی<sup>۱</sup> که در سال ۲۰۰۹ انجام شد، مدل مبتنی بر عامل، یک شبیه‌ساز متشکل از تعدادی تصمیم‌گیرنده (نماینده) است که از طریق قوانین مشخص شده با یکدیگر تعامل دارند. چنین عواملی در یک محیط پویا تعبیه شده و در تعامل با آن محیط هستند و ظرفیت یادگیری و انطباق در پاسخ به تغییرات سایر عوامل و محیط را دارند [۵۰]. به‌طور کلی، روش ABM<sup>۲</sup> دارای یک فلسفه اساسی از فردگرایی است که از تمرکز روی منحصربه‌فرد بودن افراد و تعاملات بین آنها حمایت می‌کند و ادعا می‌کند که فرض همگونی افراد ممکن است نتایج گمراه‌کننده‌ای به دنبال داشته باشد [۱۳]. در واقع، مدل‌سازی عامل‌بنیان یک رویکرد پائین‌به‌بالا از شبیه‌سازی سیستم است که در آن تمرکز روی رفتار و تصمیم‌گیری عوامل فردی در یک محیط است. این عوامل توسط خصوصیات نظیر خودمختاری و خودکفائی، وجود تعامل با سایر عوامل و یا محیطی که یک عامل در آن وجود دارد معرفی شده‌اند. در این مدل‌ها، قوانینی برای عوامل مشخص می‌شود که تعاملات و بازخوردهایی که بین خود عوامل یا بین آنها و محیط زیست رخ می‌دهد را متمایز می‌کند [۴۰].

مدل‌های عامل‌بنیان در مدل‌سازی هیدرولوژیکی-اجتماعی در دو زمینه استفاده می‌شوند: زمینه اول کشف رفتار ظهور یافته در یک سیستم بوده و زمینه دوم، تشخیص نتایج در مقیاس ماکرو<sup>۳</sup> است که از تعاملات بین عوامل ناهمگون فردی و محیطی بر می‌آیند [۵۱]. در نهایت، مدل‌های عامل‌بنیان به‌طور خاص می‌توانند پدیده‌های مهمی را در زمینه مکانیزم‌های تصمیم‌گیری نشان دهند که در حالت عادی به صورت ریاضیاتی به سختی به نمایش در می‌آیند [۵۲]. بر این اساس، این مدل‌ها این قابلیت را دارند که در زمینه سیاست‌گذاری در مدیریت منابع آب به راحتی به کار روند،

<sup>1</sup> Farmer and Foley

<sup>2</sup> Agent-Based Modelling

<sup>3</sup> macro-scale consequences

همان‌گونه که در زمینه تاب‌آوری، ماجا شلوتر<sup>۱</sup> و کلودیا پاول ووسل<sup>۲</sup> (۲۰۰۷) [۵۳] از یک مدل عامل‌بنیان برای بررسی سطوح متفاوت تاب‌آوری در سیستم‌های حکمرانی مختلف در حوضه رودخانه امودریا<sup>۳</sup> استفاده کردند. هدف از این مطالعه، بررسی اثر سه عامل ساختار سازمانی مدیریت آب، سطح اطلاعات از میزان در دسترس بودن آب و تنوع کاربری‌های آب بر تاب‌آوری سیستم بود. در کاربرد مدل‌سازی عامل‌بنیان، یکی دیگر از مطالعات مؤثری که به خوبی تأثیر گنجاندن بازخوردها و مفاهیم پایه سیستم اجتماعی-هیدرولوژیکی را در تغییر تقاضا و تخصیص آب بررسی کرد، مطالعه سرینواسان<sup>۴</sup> (۲۰۱۵) بود که با سیری در گذشته، به بررسی دلایل خشک شدن روخانه آرکواتی<sup>۵</sup> پرداخت که اگر تصمیمات مدیریتی در گذشته متفاوت می‌بود نتایج و پاسخ‌های سیستم تا چه اندازه متفاوت می‌شد [۵۴]. در این مطالعه یک مدل اجتماعی-هیدرولوژیکی ارائه شد که بازخوردهای بین انسان، سیستم‌های مهندسی و هیدرولوژیکی در چنای<sup>۶</sup> هند را در طول چهل سال شبیه‌سازی کرد. مدل ارائه‌شده، نتایج دو فرآیند مدیریتی سریع مانند مدیریت کوتاه‌مدت مخزن و تغییر منبع آب توسط مشتریان و فرآیند مدیریتی آهسته شامل سرمایه‌گذاری بلندمدت در زیرساخت‌ها توسط شرکت آب و برق (مانند ساخت مخزن و لوله‌ها) یا توسط کاربران (مانند چاه‌ها و اتصالات لوله‌ای) را مقایسه می‌کرد. تحقیقات ذکرشده، کاربرد گسترده مدل‌های غیرمتمرکز در شبیه‌سازی سیستم‌های اجتماعی-هیدرولوژیکی و تأثیرات دوسویه سیستم‌های انسانی و هیدرولوژیکی را بیان می‌کند. مدل‌های عامل‌بنیان، به‌طور خاص در مدیریت پایدار منابع آب نیز کارایی خود در مطالعات بسیاری نشان داده‌اند که در ادامه به بررسی دقیق این مطالعات و نقاط ضعف هر یک از آن‌ها پرداخته خواهد شد.

## ۲-۴- کاربرد مدل‌های عامل‌بنیان در مدیریت منابع آب

به‌طور ویژه مدل‌های عامل‌بنیان در مدیریت منابع آب در بخش‌های مختلفی اعم از مدیریت آب شهری [۵۵، ۵۶]، آب کشاورزی [۱۰، ۳۱]، کاربری‌های چندگانه [۵۷] و مدیریت منابع تحت تأثیر شرایط تغییر اقلیم [۵۸] پتانسیل مهمی را تاکنون از خود نشان داده‌اند. بنابراین می‌توان مدل‌های عامل‌بنیان را به‌عنوان یک ابزار تضمینی جهت بررسی تعاملات بین انسان و سیستم‌های آبی به حساب آورد؛ چراکه ویژگی‌های اصلی سیستم‌های انسان-محیط‌زیست را به‌خوبی نشان می‌دهند. در کاربرد مدل‌های عامل‌بنیان در مدیریت آب شهری، یکی از پیش‌تازان در تشخیص علل زیربنایی تغییرات تقاضای آب شهری به‌جای روابط علت و معلولی، مطالعه گالان و همکاران (۲۰۰۹) است که از یک مدل عامل‌بنیان به‌عنوان ابزار اکتشافی به‌منظور تجزیه و تحلیل روابط زمینه‌ساز تقاضای آب شهری استفاده کرده است. این مطالعه یک چارچوب ترکیبی ABM، برای ارزیابی تأثیر شهرنشینی بر مصرف آب خانگی با استفاده از شبیه‌سازی سطوح درآمد خانوار، مهاجرت و نگرش‌های اجتماعی نسبت به منابع آب فراهم کرده است [۵۹]. از دیگر مطالعات در زمینه مدیریت آب شهری با استفاده از مدل‌های عامل‌بنیان، کانتا<sup>۷</sup> در سال ۲۰۱۳ به بررسی استراتژی‌های مدیریت آب تطبیقی و اثرات

<sup>1</sup> Maja Schlüter

<sup>2</sup> Claudia Pahl-Wostl

<sup>3</sup> Amudarya

<sup>4</sup> Srinivasan

<sup>5</sup> Arkavathy

<sup>6</sup> Chennai

<sup>7</sup> Kanta

استراتژی‌های حفاظت آب بر صرفه‌جویی آن پرداخت. در پژوهش او، دو استراتژی مدیریت منابع آبی شامل استراتژی‌های انتقال درون حوضه‌ای و استراتژی حفاظت مبنا اجرا شد. نتایج نشان داد که استراتژی حفاظت مبنا پمپاژ مطابق با شرایط اقلیمی قادر است که معیار ذخیره‌سازی حفاظتی در طول سال شامل یک دهه خشکسالی برآورده کند. ضمن اینکه، ترکیبی از استراتژی‌های حفاظت آب سخت‌گیرانه و یک استراتژی پمپاژ تطبیقی قادر است کاهش متوسطی را در تقاضا بدون نیاز به محدودیت‌های پایدار استفاده از آب در فضای باز ایجاد کند [۶۰].

اتخاذ سیاست‌های خاص مدیریت تقاضا شامل مشوق‌های اقتصادی، آموزش‌ها، آگاهی‌سازی‌های عمومی و سایر مشوق‌های تأثیرگذار در مدیریت آب شهری در تلاش دیگری در مطالعه دربندسری و همکاران (۲۰۱۷) در یک چارچوب جدید بر پایه مدل‌سازی عامل‌مبنا، به‌منظور شبیه‌سازی ویژگی‌های رفتاری مصرف‌کنندگان آب مسکونی و تعاملات اجتماعی آن‌ها انجام پذیرفت. چارچوب پیشنهادی به‌جهت ارزیابی پاسخ‌های کاربران آب خانگی حاضر در بخش غربی کلان‌شهر تهران نسبت به عواملی مانند: آگاهی اجتماعی در مورد شرایط هیدرولوژیکی، قیمت‌گذاری آب، سیاست‌های تبلیغاتی، تعاملات و ارتباطات اجتماعی، به کار برده شد. نتایج این تحقیق نشان داد که افزایش قیمت آب و سرمایه‌گذاری روی تبلیغات می‌تواند به‌عنوان راهکارهای مدیریت مصرف آب در بخش مسکونی، در منطقه مورد مطالعه مؤثر واقع شود [۶۱].

در مدیریت آب شهری، پاسخ مصرف‌کنندگان آب به استراتژی‌های مدیریت تقاضا می‌تواند بر عملکرد مدیریت، و پذیرش پویای استفاده از وسایل کم‌مصرف آب می‌تواند بر تکامل در دسترس بودن آب تأثیر بگذارد. در نتیجه، این تعاملات می‌تواند موجب عدم تعادل عرضه و تقاضا شوند که با استفاده از مدل‌های مهندسی سنتی قابل پیش‌بینی نمی‌باشند و بر اهمیت در نظر گرفتن مدیریت عرضه و تقاضا در تکامل با یکدیگر تأکید می‌کند. در راستای مدیریت عرضه و تقاضا به‌صورت پویا، مشهدی و همکاران در سال ۲۰۱۷ یک رویکرد مدل‌سازی دینامیک را برای شبیه‌سازی پویایی عرضه و تقاضا با استفاده از یک چارچوب مدل‌سازی مبتنی بر عامل توسعه داد که مدل‌های تصمیم‌گیری مصرف‌کنندگان و مدیران شرکت را با مدل شبیه‌سازی منبع آب جفت می‌کرد. این چارچوب برای سیستم تأمین آب در رالی<sup>۱</sup>، کارولینای شمالی<sup>۲</sup> به‌منظور ارزیابی پایداری برنامه‌های مدیریت خشکسالی اعمال شده است. دقت مدل با استفاده از معیارهای آماری ارزیابی شده و سناریوهای متعدد تغییر اقلیم نیز با ادغام مقادیر میانگین ماهانه داده‌های بارش، تبخیر و تعرق ایجاد شدند. نتایج حاکی از آن بود که استفاده از رویکرد مدل‌سازی مبتنی بر عامل برای پیش‌بینی اثربخشی سیاست‌های مدیریتی و توصیه سیاست‌های خشکسالی برای بهبود پایداری منابع آب شهری روشی کارآمد است [۶۲].

بهبود مدل‌های اجتماعی-هیدرولوژیکی در سیستم‌های آب شهری در مطالعه ال‌امین و همکاران (۲۰۱۸) با استفاده از یک جزء شبیه‌ساز آب زیرزمینی در مطالعه سیستم آب شهری در حوضه رودخانه ورد<sup>۳</sup> دنبال شده است. در این

<sup>1</sup> Raleigh

<sup>2</sup> North Carolina

<sup>3</sup> Verde

پژوهش یک چارچوب مبتنی بر عامل به جهت بررسی تعاملات هماهنگ بین مصرف کنندگان و سیاست گذاران برای شبیه سازی تقاضای آب به کار برده شده و از مدل آب زیرزمینی مادفلو<sup>۱</sup> به منظور ارزیابی اثر رفتار مصرفی عوامل بر سطح آب زیرزمینی استفاده شده است. در این پژوهش، دو برنامه حفاظت از آب شامل یک رویکرد واکنشی و یک رویکرد فعال، برای محدود کردن آبیاری چمن در فضای باز مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد که تفاوت معناداری در صرفه جویی مصرف آب برای استراتژی های مدیریت فعال و واکنشی وجود دارد [۳].

در برخی مطالعات، مدل سازی مبتنی بر عامل به عنوان یک ابزار مؤثر در توسعه مدل های یکپارچه انسان و محیط زیست در مدیریت و **حل مناقشات** بین چند ذی نفع با منافع متمایز نیز مورد استفاده قرار گرفته است [۶۳ - ۶۵]. به طور مثال، در مطالعه ای که توسط نیکولیک<sup>۲</sup> و سیمونویک<sup>۳</sup> (۲۰۱۵)، در حوضه مطالعاتی رودخانه تیمز<sup>۴</sup> در اونتاریو کانادا با استفاده از مدل های عامل بنیان انجام شد، میزان تخصیص آب در چارچوب یک مدل **حل مناقشات** مشخص شد. این مطالعه چهار مصرف اصلی کشاورزی، صنعتی، تجاری و شهری را به عنوان عوامل اثرگذار در مدل سازی در نظر گرفت. نتایج این مطالعه، گواهی بر ارتباط زیاد بین تغییرات جریان هیدرولوژیکی و فعالیت های اجتماعی-اقتصادی منطقه بود [۶۶].

بررسی رفتار هریک از مصرف کنندگان چندگانه شامل: عوامل شهری، صنعتی و کشاورزی در مدیریت جامع منابع آب در مطالعه شیائو<sup>۵</sup> و همکاران (۲۰۱۸) با استفاده از یک رویکرد مدل سازی مبتنی بر عامل به منظور ارزیابی رفتار مصرف کنندگان آب و مدیریت تقاضای آب<sup>۶</sup> در حوضه یک رودخانه در جنوب آلبرتا<sup>۷</sup> دنبال شده است. در این روش، هر عامل استراتژی خود را در خصوص صرفه جویی یا مصرف بیشتر آب به منظور دستیابی به بازده اقتصادی بهتر بر مبنای طرح تخصیص اولیه کنترل می کند؛ همچنین اثرات رفتار عاملان بر بازده اقتصادی خود و مجموع اثرات رفتار فردی بر سیستم بررسی گردید. نتایج حاصل از مطالعه موردی نشان می دهد که فعالان کشاورزی همیشه مایل به صرفه جویی در مصرف آب تا رسیدن به حد مجاز هستند. همچنین، عوامل شهری و صنعتی خواهان محدودیت های حفاظتی بالاتری هستند تا آب بیشتری برای مصرف و پتانسیل بالاتری برای بازده اقتصادی داشته باشند [۶۷].

به منظور بهبود کارایی مدل های **حل اختلاف** در مدیریت منابع آب با استفاده از مدل های عامل بنیان، دربندسری در سال ۲۰۲۰ با اعمال یک مدل شبیه سازی آب زیرزمینی در چارچوب مدل بیلان، به ارزیابی سیاست های مدیریتی در یک حوضه مطالعاتی در غرب استان تهران پرداخت. چارچوب حل تعارض توسعه یافته شامل: یک مدل مبتنی بر عامل برای شبیه سازی رفتارها و تعاملات همه ذی نفعان، یک مدل شبیه سازی حوضه که عوامل در آن عمل می کردند، و یک مدل تصمیم گیری بر اساس بازی رهبر-پیرو، بوده است. در این پژوهش، سه نوع سیاست مجزا درباره قیمت آب و

<sup>1</sup> MODFLOW  
<sup>2</sup> Nikolic  
<sup>3</sup> Simonovic

<sup>4</sup> Thames  
<sup>5</sup> Xiao  
<sup>6</sup> Water Demand Management (WDM)

<sup>7</sup> Alberta

برق، پروژه جمع‌آوری فاضلاب و محدودیت استفاده از آب زیرزمینی توسعه یافت که سناریوها در طی سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۴۳ اجرا شدند. با توجه به نتایج حاصل شده، بهترین سناریو بر اساس مدل حل اختلاف ارائه شده شامل ۴۰ درصد نرخ رشد سالانه قیمت آب و برق، عدم اجرای طرح جمع‌آوری فاضلاب و محدودیت بالای استفاده از آب زیرزمینی می‌شد. این در حالی بود که سیاست یکسان با ۵۰ درصد نرخ رشد سالانه قیمت، تقریباً همان نتایج را نشان می‌داد. در نهایت، نتایج از لزوم افزایش قیمت آب و برق در اسرع وقت حکایت می‌کرد [۶۳]. لازم به ذکر است که شبیه‌سازی وضعیت محدوده در این مطالعه نیز با استفاده از یک مدل توده‌ای انجام پذیرفت.

در این راستا، استفاده از مدل توزیعی هیدرولوژیکی در مدیریت آب شهری در مطالعه هاشم‌پور در سال ۲۰۲۰ دنبال شده است. این مطالعه، یک مدل بهینه‌سازی بر مبنای ریسک مبتنی بر عامل را توسعه داد که می‌توانست ظرفیت منابع آب و عدم قطعیت‌های تقاضای آب را به‌منظور تعیین تخصیص بهینه آب سالانه محاسبه کند. بر این اساس یک مدل بهینه‌سازی برای کمینه‌کردن ریسک تأمین آب در افق بلندمدت و به دست آوردن احتمالات سالانه تأمین کامل تقاضای آب در این مدل استفاده شد و منابع آب سطحی و زیرزمینی، به ترتیب با استفاده از نرم‌افزارهای HMETs و MODFLOW مدل‌سازی شدند و از مدل شبکه عصبی برای آموزش و صحت‌سنجی نتایج مدل MODFLOW استفاده گردید. سپس، مدل مبتنی بر عامل توسعه یافته، ویژگی‌های عامل، نقش‌های عوامل و تعاملات آن‌ها را با استفاده از رویکرد امتیازدهی بوردا<sup>۱</sup> در نظر گرفت که سازگارترین استراتژی‌های مدیریتی را برای افزایش عرضه آب یا اصلاح تقاضای آب تعیین می‌کند. چارچوب پیشنهادی برای شهر شیراز واقع در کشور ایران، طی سال‌های ۲۰۱۸ تا ۲۰۵۰ اجرا شد. نتایج مطالعه نشان داد که آگاهی اجتماعی و جیره‌بندی سخت آب باید به‌طور جدی در حوضه مورد بررسی اجرا گردد تا احتمال عرضه کامل نیاز آبی به بیش از ۸۰ درصد تحقق یابد؛ اگرچه این دو استراتژی همیشه کارآمد نیستند [۶۸]. در این مطالعه نیز همچنان مدل توزیعی توسعه یافته با استفاده از آموزش فرامدل‌ها به مدل توده‌ای تبدیل شده و دستیابی به یک مدل شبیه‌سازی توزیعی هیدرولوژیکی ناکام مانده است.

با توسعه مدل‌های عامل‌بنیان در رویکرد اجتماعی-هیدرولوژیکی، تعداد قابل ملاحظه‌ای از مقالات پیشین بر مبنای کاربرد این مدل‌ها در سیستم‌های کشاورزی منتشر شده‌اند. مدل‌های عامل‌بنیان در مدیریت آب کشاورزی در ابتدا بر پایه تئوری انتخاب منطقی و بیشینه‌کردن سود کشاورزان و یا در قالب بازی و به‌صورت همکارانه یا غیرهمکارانه توسعه یافتند [۳۱، ۶۹]؛ در حالی که ونز و همکاران در سال ۲۰۲۰ با استفاده از یک مدل عامل‌بنیان مشخص کردند که تئوری انتخاب منطقی، سود کشاورزان را در پاسخ به شرایط خشکسالی در مقایسه با داده‌های تاریخی دست کم می‌گیرد. بنابراین، تطابق کشاورزان با خشکسالی نمی‌تواند به‌تنهایی با فاکتورهای اقتصادی بیان شود. این مطالعه بیان می‌کند که تطابق انسان با خشکسالی با تئوری رفتار عقلانیت محدود بهتر توضیح داده می‌شود [۷۰].

<sup>1</sup> Borda Scoring

مدیریت پایدار آب کشاورزی بر پایه سیاست‌های حفاظتی متنوعی نظیر: اصلاح الگوی کشت، کاربرد فناوری‌های نوین آبیاری، کشاورزی نوین و توسعه بازار آب صورت می‌گیرد که در مطالعات مختلف دنبال شده‌اند [۷۱]. از آنجائی که انتخاب محصولات کشاورزی در مدیریت پایدار آب کشاورزی تأثیر بسزایی دارد، درک فرآیند تصمیم‌گیری کشاورزان در انتخاب نوع محصولات از اهمیت بالائی برخوردار است. تا به حال، مطالعات زیادی با هدف شبیه‌سازی الگوی کشت انجام شده که بسیاری از آن‌ها با استفاده از رویکرد بهینه‌سازی صورت گرفته است؛ در حالی که طبق تحقیقات تجربی، رفتار کشاورزان تا حدی منطقی بوده و درک دقیق فرآیندهای تصمیم‌گیری آن‌ها بر مبنای مشخصه‌های رفتاری تحقق می‌یابد.

به‌طور مثال، در مطالعه یوآن<sup>۱</sup> که در سال ۲۰۲۱ انجام شد، یک مدل مبتنی بر عامل توسعه پیدا کرد که تأثیر پارامترهای درک عدم قطعیت در قیمت‌های محصول آینده، هزینه کاشت محصول و سطح تحمل کشاورزان به تغییرات سود محصول، در فرآیند انتخاب محصول و نیز نحوه استفاده از آب تحت اثر سیاست‌های مدیریت آب، در حوضه رودخانه هیهه<sup>۲</sup> واقع در شمال غربی چین را بررسی کرده است. نتایج این مدل‌سازی نشان داد که کشاورزان با ادراک ماجراجویانه و سطح تحمل بالا (نوع I)، تمایل به انتخاب محصولات پرسود داشتند. این نوع از کشاورزان به احتمال زیاد الگوی تک‌محصولی با سود بالا و مصرف آب زیاد را در پیش گرفتند. در مقابل، کشاورزان با ادراک محتاطانه و سطح تحمل پایین (نوع II)، محصولات با سود ثابت را ترجیح دادند؛ آن‌ها معمولاً توجه بیشتری به تنوع سود محصول می‌کردند و در نتیجه یک الگوی کشت در ترکیب با سود محصول کم و مصرف آب کم ترجیح دادند [۷۲].

در تلاش دیگری، بررسی تأثیر اصلاح الگوی کشت و استفاده از فناوری‌های نوین آبیاری به‌طور همزمان، در مطالعه بهرامی و افشار (۱۳۹۸) محقق شده است. این مطالعه از یک مدل عامل‌بنیان در ترکیب با یک مدل اتوماتای سلولی<sup>۳</sup> به‌جهت مدیریت بهینه مخزن بهره‌گرفت. در این مطالعه، تقاضای آب کشاورزان بر اساس خصوصیات اصلی اجتماعی-اقتصادی آن‌ها با توجه به پارامترهای سن، تحصیلات، توانائی ریسک‌پذیری و وابستگی به درآمد کشاورزی مشخص شد که در طول زمان و مکان متفاوت بوده و کشاورزان با تغییر الگوی کشت و فناوری آبیاری به میزان آب موجود پاسخ دادند. نتایج این مطالعه نشان داد که از طریق تعامل پویا بین کشاورزان و اپراتورهای مخزن، تنش آبی تجربه‌شده توسط کشاورزان حدود ۵۰ درصد کاهش می‌یابد؛ ضمن اینکه کشاورزان با اتخاذ تصمیمات سازگار تحت شرایط مختلف، ۲۰ درصد بیشتر سود کسب کردند. همچنین، مهم‌ترین عاملی که بر پاسخ‌های کشاورزان تأثیر می‌گذارد میزان ریسک‌پذیری است که می‌تواند برای افزایش انعطاف‌پذیری کشاورزان در تصمیم‌گیری‌هایشان مدیریت شود [۷۳].

<sup>1</sup> Yuan

<sup>2</sup> Heihe River Basin (HRB)

<sup>3</sup> Cellular Automata (CA)



در جهت مدیریت پایدار کشاورزی با استفاده از روش‌های نوین، مطالعه شوشتریان در سال ۲۰۲۲ به بررسی پویایی‌های استفاده از آب بازیافتی، توسط کشاورزان می‌پردازد. در این پژوهش، یک مدل مبتنی بر عامل برای شبیه‌سازی مصرف آب کشاورزی و پویایی اجتماعی-هیدرولوژیکی که در حوضه کالیفرنیا توسعه داده شد، مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج این مقاله نشان داد که استفاده مجدد از آب کشاورزی توسط کشاورزان فرآیندی تدریجی و زمان‌بر است. علاوه بر این، نتایج حاکی از آن بود که استفاده مجدد از آب کشاورزی می‌تواند به طور قابل توجهی کمبود آب (۵۷/۷ درصد) و برداشت آب زیرزمینی (۷۴/۱ درصد) را کاهش دهد. همچنین، نتایج این مطالعه نشان داد که قیمت آب بازیافتی، تأثیرگذارترین عامل در کل مصرف آب بازیافتی توسط کشاورزان بوده و نیز عنوان کرد که چگونه کمبود آب شیرین یا مقررات برداشت آب زیرزمینی قادر است استفاده از آب بازیافتی توسط کشاورزان را افزایش دهد [۷۴].

علاوه بر مکانیزم‌های حفاظتی اشاره شده، بازارهای آب به عنوان یک رویکرد مؤثر به منظور حمایت از استفاده کارآمد از منابع محدود آب و افزایش تولید محصول در سیستم‌های کشاورزی در نظر گرفته می‌شوند که به طور گسترده توسط مدل‌های عامل‌بنیان مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. در رابطه با این موضوع، دو<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۷) یک مدل مبتنی بر عامل را در حوضه رودخانه گوآدالوپ<sup>۲</sup> در تگزاس برای شبیه‌سازی بازار آب کشاورزی فرضی تحت شرایط مختلف هیدرولوژیکی گسترش دادند تا رفتارهای آبیاری کشاورزان بر مبنای میزان حساسیت آن‌ها به کمبود آب در خاک (پارامتر K) و رفتار پیشنهاد قیمت که توسط نرخ سودجویی (متغیر I) و نرخ یادگیری (متغیر b) را در یک بازار فرضی بر پایه حراج دوگانه بررسی کند. نتایج نشان داد که از بین سه پارامتر رفتاری، K تأثیر بیشتری بر پتانسیل بازار آب می‌گذارد و اثرات آن بر عملکرد بازار آب در اکثر سناریوها قابل توجه است و در عین حال، تأثیر I یا b به دو پارامتر دیگر بستگی دارد. بر این اساس، بازار آب تنها زمانی می‌تواند تولید محصول را به طور قابل توجهی افزایش دهد که دو شرط برآورده شود: شرط اول آنکه K کوچک باشد و شرط دیگر آنکه I کوچک و یا b بزرگ باشد. شرط اول مستلزم برنامه‌ریزی کارآمد آبیاری و شرط دوم مستلزم مؤسسات بازار آب توسعه یافته‌ای است که مشوق‌هایی را برای پیشنهاد ارزش‌گذاری واقعی مجوزهای آب ارائه می‌دهند [۷۵].

در مطالعه ذورالفقاری پور و احمدی (۱۴۰۰)، در چارچوب یک مدل عامل‌بنیان در یک دوره هشت‌ساله شبیه‌سازی از سال ۱۳۸۹ که متشکل از سه زیرمدل اجتماعی، اقتصادی و هیدرولوژیکی است، به بررسی تعاملات یک بازار آب زیرزمینی درون‌بخشی در محدوده اصفهان-برخوار پرداخته شده است. نتایج تحلیل اقتصادی-اجتماعی در این مطالعه نشان داد که با برقراری شرایط بازار در محدوده، منافع شرکت‌کنندگان در بازار به میزان ۲۷ درصد افزایش یافته، ضمن اینکه سطح آبخوان نیز بهبود افت ۶۴ سانتی‌متری را تجربه می‌کند [۷۶].

<sup>1</sup> Due

<sup>2</sup> Guadalupe

مطابق با آنچه پیش‌تر نیز اشاره شد، کشاورزان در زمان خشکسالی با اتخاذ استراتژی‌های مختلف مانند تکنولوژی‌های حفاظت آب و تغییر الگوی کشت با شرایط تطابق پیدا کرده‌اند. اگرچه این کاهش مصرف آب می‌تواند منجر به افزایش انگیزه کشاورزان به توسعه مساحت کشاورزی و در نهایت وقوع پدیده بازگشت تقاضای آبی کشاورزی اولیه شود. در بررسی این پدیده، قریشی و همکاران (۲۰۲۱) یک مدل تقاضای آب کشاورزی مبتنی بر عامل را توسعه دادند که رفتار کشاورزان در اتخاذ سیستم‌های آبیاری جدید در مزرعه با تغییر الگوهای محصول در پاسخ به شرایط خشکسالی، در حوضه رودخانه بو<sup>۱</sup> در کانادا شبیه‌سازی می‌کند. این مطالعه نشان داد که به چه نحوی، نگرش کشاورزان نسبت به سود، ریسک‌گریزی، حفاظت از محیط‌زیست، تعامل اجتماعی و گسترش آبیاری، پویایی تقاضای آب را توضیح می‌دهد و دیگر اینکه چگونه برنامه حفاظت آب در کانادا ممکن است به‌طور متناقضی منجر به پدیده بازگشت شود. بر اساس نتایج این تحقیق، تعاملات اجتماعی نقش مهمی در تقاضای آب دارد و تعامل اجتماعی بین کشاورزان به‌شدت بر پذیرش فناوری تأثیر می‌گذارد و عامل مؤثری در پدیده بازگشت است [۷۷]. قریشی و همکاران (۲۰۲۱) در تکمیل مقاله اول در رابطه با بررسی پدیده بازگشت در حوضه رودخانه بو در کانادا، با انجام یک تحلیل حساسیت مبتنی بر واریانس متغیر با زمان در مدل عامل‌بنیان، تأثیر هریک از عوامل ذکر شده در مطالعه پیشین و اثر توأمان این پارامترها را سنجیدند. با توجه به نتایج این مطالعه، فاکتورهای اقتصادی با یک روند صعودی در طول زمان (یعنی اهمیت فزاینده) به‌عنوان تأثیرگذارترین عامل در پدیده بازگشت کشاورزی در محدوده مورد بررسی شناخته شدند. این مطالعه پیشنهاد می‌کند که به جهت کنترل پدیده بازگشت لازم است انواع جدیدی از محصولات با ارزش بالا و نیاز نسبی کمتر به آب تولید شود. به‌علاوه اینکه عامل تعامل اجتماعی تأثیر کلی زیادی بر پدیده بازگشت دارد و نقش مهم مشارکت جامعه به‌عنوان یک استراتژی، برای بهبود آگاهی جامعه و اجتناب از پدیده بازگشت برجسته است و در نهایت، این مطالعه پیشنهاد می‌کند که هر راهبردی که با عامل تعامل اجتماعی مرتبط باشد، باید با سایر راهبردهای مرتبط با گروه اقتصادی برای کنترل پدیده بازگشت به کار گرفته شود [۷۸].

بررسی مطالعات موجود نشان می‌دهد که اغلب مدل‌های سیستم‌های انسانی-طبیعی فقط به‌طور ضعیفی با هم در ارتباط هستند؛ به‌همین دلیل، تأثیر اعمال انسان بر جریان‌های هیدرولوژیکی را به‌طور کامل نشان نمی‌دهند [۷۹]. درک تغییرات شرایط هیدرولوژیکی در مقیاس مکان و زمان در برابر تصمیمات عوامل انسانی از اهداف اصلی رویکرد اجتماعی-هیدرولوژیکی است که از نقاط ضعف بسیاری از مطالعات اشاره‌شده به‌شمار می‌رود. استفاده از مدل‌های توده‌ای در ترکیب با مدل‌های اجتماعی ممکن است ناهمگونی مکانی و زمانی موردنظر در رویکرد انسان-آب را به‌خوبی ارائه نکند. در راستای حل این چالش، توسعه ابزارهای مدل‌سازی مناسب که فرآیندهای هیدرولوژیکی را با وضوح مکانی بالایی شبیه‌سازی کند اهمیت بالایی دارد. بهبود این نقصان را می‌توان تا حد زیادی در چارچوب

<sup>1</sup> Bow River Basin

توسعه یافته در برخی از مطالعات اخیر با استفاده از مدل‌های عامل بنیان یافت. به طور مثال، مطالعه کاستیلا رو<sup>۱</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۵، یک محیط مدل‌سازی تعاملی به نام فلولوگو<sup>۲</sup> را برای توسعه مدل‌های آب زیرزمینی جفت شده با مدل عامل بنیان<sup>۳</sup> ارائه کرد. بسته فلولوگو بر اساس روش تفاضل محدود، به حل معادلات حاکم بر جریان در محیط نرم افزار نت‌لوگو<sup>۴</sup> می‌پردازد. کارایی این محیط با اجرای یک سیستم آبخوان فرضی در تعامل با مجموعه‌ای از کشاورزان به عنوان کاربران آب زیرزمینی نشان داده شده است. ارزیابی سناریوهای مختلف مدیریتی، پتانسیل پلتفرم ارائه شده به عنوان یک ابزار پشتیبانی تصمیم‌گیری را نشان داده که به کاربران اجازه می‌دهد تا تجربیات مدیریتی را بر یک جامعه مصنوعی از عوامل تطبیقی اعمال کنند [۸].

خان و همکاران در سال ۲۰۱۷ به منظور بهبود این نقصان، در مدیریت پایدار دو رودخانه فرامرزی میکونگ<sup>۵</sup> در جنوب شرقی آسیا و رودخانه نیجر<sup>۶</sup> در غرب آفریقا، یک مدل عامل بنیان جامع توزیعی، در ترکیب با یک مدل هیدرولوژیکی نیمه توزیعی SWAT توسعه دادند. این مطالعه، برای شبیه‌سازی اثرات تصمیمات مدیریتی که بر چرخه نکسوس<sup>۷</sup> غذا، آب، انرژی و محیط زیست اثر می‌گذارد، استفاده شد. عوامل در نظر گرفته شده در این مدل شامل تولید محصولات کشاورزی، انرژی برق آبی و اکوسیستم تحت تأثیر بود. بر اساس یافته‌ها، تصمیمات مدیریتی تأثیر بارزتری بر تولید محصولات کشاورزی در مقایسه با تولید برق آبی داشت و تغییر این سیاست‌ها اثر کمتری بر سلامت اکولوژیکی می‌گذاشت. با این وجود، این امر به شدت به حوضه رودخانه، شاخص‌های سلامت اکولوژیکی و اقدامات مدیریت آب وابسته بود [۸۰].

در پژوهشی دیگر، دو و همکاران (۲۰۲۲) به منظور لینک کردن دو طرفه مدل اجتماعی و هیدرولوژیکی، یک طرح سیاست‌گذاری توزیعی با ویژگی پویایی در مکان و زمان به منظور مدیریت هم‌زمان آب سطحی و آب زیرزمینی ارائه دادند. در تحقیق آن‌ها، یک مدل کاملاً یکپارچه به منظور جفت کردن تنگاتنگ یک مدل عامل بنیان برای شبیه‌سازی رفتار مصرفی کشاورزان تحت سیاست‌های توزیعی، با یک مدل هیدرولوژیکی برای شبیه‌سازی آب سطحی و آب زیرزمینی توسعه یافت. این مدل در حوضه رودخانه هیه<sup>۸</sup> اعمال شد. عوامل مد نظر در این مدل عامل بنیان، شامل عوامل مدیریتی و کشاورزان بودند و از مدل توزیعی HEIFLOW به جهت شبیه‌سازی یکپارچه آب سطحی و زیرزمینی استفاده شد. بر اساس دستاوردهای این مطالعه، پاسخ‌های هیدرولوژیکی در مقیاس مکانی، ناهمگونی‌های قابل توجهی را نشان داد که بر اهمیت سیاست‌گذاری توزیعی در مقیاس زمان و مکان تأکید کرد؛ بدین ترتیب، در حوضه یک رودخانه بزرگ، برخی مناطق واکنش هیدرولوژیکی فعال‌تری نسبت به سیاست‌های مدیریت آب داشتند [۸۱].

<sup>1</sup> Castilla-Rho

<sup>2</sup> Flowlogo

<sup>3</sup> Groundwater-Agent-based modelling (GW-ABM)

<sup>4</sup> Netlogo

<sup>5</sup> Mekong

<sup>6</sup> Niger

<sup>7</sup> Nexus

<sup>8</sup> Heihe River Basin

با در نظر گرفتن تمامی مزیت‌های مدل‌های عامل‌بنیان در توسعه روزافزون دانش هیدرولوژیکی-اجتماعی، به کارگیری این مدل‌ها همچنان با چالش‌های مهمی روبرو است. از جمله چالش‌های مطرح شده در این زمینه می‌توان به لزوم وجود داده‌های طولانی مدت با دقت بالا، دشواری کمی‌سازی، اندازه‌گیری مشخصه‌های اجتماعی در مدل و نحوه شبیه‌سازی رفتار عامل‌ها اشاره کرد. این موارد به نوبه خود می‌توانند چالش‌هایی را در زمینه کالیبراسیون و صحت‌سنجی مدل‌های هیدرولوژیکی-اجتماعی ایجاد کنند [۸۲، ۸۳]؛ علاوه بر این، از آنجا که بسیاری از پارامترهای هیدرولوژیکی مانند تراز آب زیرزمینی، میزان بارش و رواناب در موقعیت‌های مکانی مختلف متغیر هستند، لازم است تا دقت موردنیاز در توزیع مکانی پارامترها به جهت شبیه‌سازی ناهمگونی‌ها در تصمیم‌گیری عوامل انسانی بر مبنای موضوع مطالعاتی لحاظ گردد [۸۴]. بر اساس پیشنهادات موجود برای رفع این مشکلات، با توسعه سیستم‌های رایانه‌ای، مدل‌های هیدرولوژیکی در ارتباط تنگاتنگ با مدل‌های اجتماعی می‌توانند تا حد زیادی موانع موجود در رابطه با کالیبراسیون مؤثر این سیستم‌های پیچیده را رفع نمایند [۸۵].

به‌طور مثال، استفاده از مدل‌های بیلان آب در تحلیل و بررسی سیستم‌های انسان-آب برای شبیه‌سازی یک منبع آب زیرزمینی در مطالعه مسائلی و احمدی در سال ۱۴۰۱ دنبال شد که تغییرات سطح آب زیرزمینی در آبخوان مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش، به منظور کالیبراسیون مدل رفتاری، سطح زیر کشت محصولات مختلف با سطح زیر کشت محصولات در شرایط واقعی مقایسه گردید. همچنین، در این پژوهش کالیبراسیون کیفی در بررسی پرسش‌نامه‌ها و توسعه مدل اجتماعی صورت گرفت. نتایج کالیبراسیون از دقت مناسب مدل توسعه یافته در شبیه‌سازی انتخاب الگوی کشت کشاورزان در محدوده لنجانان استان اصفهان حکایت می‌کند [۸۶].

مطالعه اوهب‌یزدی و احمدی در سال ۲۰۱۸ که بررسی رفتار کشاورزان و میزان همکاری آن‌ها در کاهش برداشت، عملکرد آب منطقه‌ای در کنترل چاه‌های غیرمجاز و ارجاع به مراجع قضائی را مد نظر قرار داد، به منظور کالیبراسیون مدل عامل‌بنیان توسعه یافته به مقایسه داده‌های چاه‌های مشاهده‌ای، گزارش‌های سازمان آب منطقه‌ای و اطلاعات استخراج شده از پرونده‌های قضائی مرتبط با آب پرداخت و کالیبراسیون کیفی مدل نیز از طریق مصاحبه با کارشناسان دنبال شد. داده‌های مورد استفاده در این فرآیند شامل سطح آب زیرزمینی در چاه‌های مشاهداتی در مدت ۲۸ ماه کالیبراسیون، ۸ ماه صحت‌سنجی و بررسی دادخواست‌های مطرح شده در بازه زمانی ۲۰۰۶ تا ۲۰۰۹ (۳۶ ماه) بود [۸۷].

استفاده از الگوریتم‌های تکاملی در راستای کالیبراسیون مدل‌های عامل‌بنیانی که بیانگر فرآیندهای تصمیم‌گیری عوامل انسانی هستند از جدیدترین نوآوری‌های ارائه شده می‌باشد که در مطالعات اخیر دنبال شده است. به‌طور مثال، مطالعه نوری و همکاران در سال ۲۰۱۹، در راستای کالیبراسیون رفتار عوامل کشاورزی در محدوده نجف‌آباد واقع در استان اصفهان، از الگوریتم ژنتیک برای تعیین ضرایب روان‌شناختی مدل با هدف کاهش خطای ریشه میانگین مربعات

(RMSE) بین الگوی کشت مشاهداتی و محاسباتی بهره گرفت؛ نتایج از عملکرد مطلوب کالیبراسیون حکایت می کنند [۸۸]. در این مطالعه نیز چارچوب صحت سنجی و کالیبراسیون مدل با الهام از این مطالعات توسعه یافته است.

## ۲-۵- پیشینه کاربرد تئوری‌های اجتماعی در مدل‌های عامل بنیان

مطالعه سیستم‌های انسان-آب معطوف به شناخت دقیق پیچیدگی‌های این سیستم شامل: بازخوردها<sup>۱</sup>، غیرخطی بودن روابط<sup>۲</sup>، ناهمگونی عوامل<sup>۳</sup> و تأخیرات زمانی<sup>۴</sup> است. مدل‌های عامل بنیان به عنوان ابزارهای پائین به بالا در بسیاری از مطالعات تئوری و تجربی به منظور فهم پیچیدگی‌های این سیستم‌ها به کار رفته‌اند. مزایای متعدد مدل‌های عامل بنیان در شبیه‌سازی سیستم‌های انسان-محیط زیست مانند: در نظر گرفتن ناهمگونی‌ها و توسعه تئوری‌های رفتاری، مدل‌های اقتصادسنجی و تئوری عقلانیت محدود، این مدل‌ها را به ابزار قدرتمندی در شبیه‌سازی فرآیندهای تصمیم‌گیری انسان‌ها در سیستم‌های CHANS مبدل کرده است. بدین ترتیب، در فرآیند توسعه مدل‌های به‌طور کامل جفت شده سیستم‌های انسان و طبیعت، فهم چگونگی تصمیم‌گیری انسان‌ها و فرآیند عملی کردن این تصمیمات از اهمیت بسیاری برخوردار است.

به‌طور کلی، تاکنون نه نوع مدل تصمیم‌گیری بر اساس مطالعات پیشین در شبیه‌سازی رفتار انسان‌ها در سیستم‌های انسان-طبیعت ارائه شده است. این مدل‌ها شامل: مدل‌های میکرواقتصادی<sup>۵</sup>، مدل‌های مبتنی بر نظریه فضائی<sup>۶</sup>، مدل‌های شناختی و روان‌شناسی<sup>۷</sup>، مدل‌های نهادمحور<sup>۸</sup>، مدل‌های تجربه یا تمایل محور<sup>۹</sup>، برنامه‌نویسی تکاملی<sup>۱۰</sup>، مدل‌های مشارکتی<sup>۱۱</sup>، قوانین تجربی یا ابتکاری<sup>۱۲</sup> و نهایتاً مدل‌های مبتنی بر قوانین فرضی یا کالیبره محور<sup>۱۳</sup> است؛ برخی از پژوهش‌ها نیز ترکیبی از روش‌های مذکور را به کار برده‌اند [۱۳].

با توجه به توسعه انواع مختلفی از تئوری‌های رفتاری در توصیف رفتار عوامل انسانی، مطالعات بسیاری از تئوری‌های روان‌شناسی موجود برای شبیه‌سازی این فرآیند استفاده کرده‌اند. مدل‌های شناختی یا روان‌شناسی، تصمیمات عوامل را بر اساس توانائی‌ها، باورها، تمایلات، خواسته‌ها و تعاملات با سایر عوامل توصیف می‌کنند [۸۹]. در این بین، تئوری‌های ارزش-باور-هنجار<sup>۱۴</sup>، تئوری اعتقاد و سلامت<sup>۱۵</sup> و تئوری رفتار برنامه‌ریزی شده<sup>۱۶</sup> در شبیه‌سازی رفتار عوامل انسانی در یک سیستم انسان-آب به‌طور گسترده‌ای به کار رفته‌اند [۹۰].

تئوری اعتقاد و سلامت، یکی از مدل‌های توسعه یافته در راستای شبیه‌سازی فرآیندهای تصمیم‌گیری است که برای اولین بار در دهه ۱۹۵۰ توسط گادفری هوخباوم<sup>۱۷</sup> و اروین روزنستاک<sup>۱۸</sup> معرفی شد [۹۱]. این مدل، رفتارهای یک فرد در راستای حفاظت منابع آبی را بر اساس دو متغیر کلی تهدید و انتظارات درک شده شبیه‌سازی می‌کند؛ این متغیرها

<sup>1</sup> feedbacks

<sup>2</sup> Nonlinearity

<sup>3</sup> heterogeneity

<sup>4</sup> Time lags

<sup>5</sup> Microeconomic

<sup>6</sup> Space theory based models

<sup>7</sup> Psychosocial & cognitive model

<sup>8</sup> Institution-based models

<sup>9</sup> experience- or preference-based

<sup>10</sup> evolutionary programming

<sup>11</sup> participatory agent-based

<sup>12</sup> empirical- or heuristic rules

<sup>13</sup> assumption and/or calibration-based rules

<sup>14</sup> Value-Belief-Norm (VBN)

<sup>15</sup> Health-Belief model (HBM)

<sup>16</sup> Theory of Planned Behavior (TPB)

<sup>17</sup> Godfrey Hochbaum

<sup>18</sup> Irwin Rosenstock

به ترتیب بیانگیر درک فرد از خطر یک اتفاق خاص و جنبه‌های مثبت و منفی درک شده از اتفاق موردنظر هستند. از جمله کاربردهای این نظریه در مطالعات رفتار افراد تأثیرگذار در یک سیستم آبی می‌توان به مطالعه جهانگیری (۱۴۰۰) اشاره کرد. در این پژوهش، در قالب این تئوری به بررسی مؤلفه‌های تأثیرگذار در رفتار حفاظتی کشاورزان در انتخاب الگوی کشت بهینه، در محدوده دشت عجب شیر پرداخته شده است [۹۲].

تئوری ارزش-باور-هنجار از دیگر تئوری‌های پرکاربرد در شبیه‌سازی رفتار افراد و عوامل انسانی است که برای اولین بار توسط استرن<sup>۱</sup> معرفی شد. او ملاحظات اخلاقی، نوع دوستی و آگاهی از عواقب تصمیمات گرفته‌شده را به‌عنوان مشخصه تعیین‌کننده رفتار انسان‌ها معرفی کرد [۹۳]. تئوری رفتاری یادشده تاکنون کاربرد خود را به‌خوبی در انجام مطالعات اجتماعی به‌منظور شناسایی عوامل مؤثر در رفتار صرفه‌جویی کشاورزان برای حفاظت از آبخوان در حوضه‌های متعدد نشان داده است. به طور مثال در مطالعه ژائو (۲۰۲۱) در حوضه لوئس هیلی<sup>۲</sup> در چین با استفاده از این تئوری و با به‌کارگیری معادلات ساختاری، از نتایج ۵۵۸ مصاحبه صورت گرفته با کشاورزان منطقه، عوامل مؤثر بر رفتار صرفه‌جویی کشاورزان این محدوده مطالعه شده است. نتایج این مطالعه منابعی را برای سیاست‌گذاران فراهم کرد تا راهبردهای مؤثر صرفه‌جویی در مصرف آب روستائی را در محدوده تدوین کنند. بر این اساس، سیاست‌گذاران باید تبلیغ دانش و مهارت‌های صرفه‌جویی در مصرف آب، دانش منابع آب و تغییرات محیط‌زیست را تقویت کنند. آن‌ها باید کشاورزان را تشویق کنند تا عادات خوب مصرف آب را توسعه داده و فعالانه سیستم یارانه برای وسایل صرفه‌جویی در آب را ترویج کنند. همچنین می‌بایست یک مکانیسم نظارت و مدیریت بر منابع آب ایجاد کنند و کشاورزان را تشویق به صرفه‌جویی در مصرف آب کرده تا استفاده پایدار از منابع آب محلی را تحقق بخشند [۹۴].

یکی از پرکاربردترین تئوری‌ها در شبیه‌سازی تصمیمات انسانی در یک سیستم انسان-آب تئوری رفتار برنامه‌ریزی‌شده است که بر اساس آزمایشات تجربی انجام شده در مقایسه با سایر تئوری‌ها با دقت و تناسب آماری بهتری تصمیم‌گیری افراد را شبیه‌سازی می‌کند [۹۵]. با توجه به اینکه رویکرد به‌کاررفته در این مطالعه از تئوری رفتار برنامه‌ریزی‌شده الهام گرفته است، در ادامه تاریخچه‌ای از کاربرد این تئوری در مدیریت سیستم‌های جفت‌شده آب-انسان و نحوه توسعه آن ارائه خواهد شد. تئوری کنش‌موجه که برای اولین بار در سال ۱۹۷۵ توسط فیشباین<sup>۳</sup> و آجزن<sup>۴</sup> ارائه شد، شکل اولیه‌ای از تئوری رفتار برنامه‌ریزی‌شده محسوب می‌شود. بر مبنای تئوری کنش‌موجه، تمایل و کنش یک فرد به انجام یک رفتار تابع دو مشخصه است که یکی ماهیتی شخصی و فردی دارد و دیگری دارای ماهیت اجتماعی است.

بر اساس این تئوری، انجام یک رفتار خاص تابع نگرش<sup>۵</sup> فرد به معنای ارزیابی مثبت و منفی فرد از نتایج انجام یک رفتار مشخص و هنجار ذهنی<sup>۶</sup> می‌باشد. یعنی فشار اجتماعی که فرد برای انجام یا عدم انجام یک کار از سمت جامعه

<sup>1</sup> Stern  
<sup>2</sup> Loess Hilly

<sup>3</sup> Fishbein  
<sup>4</sup> Ajzen

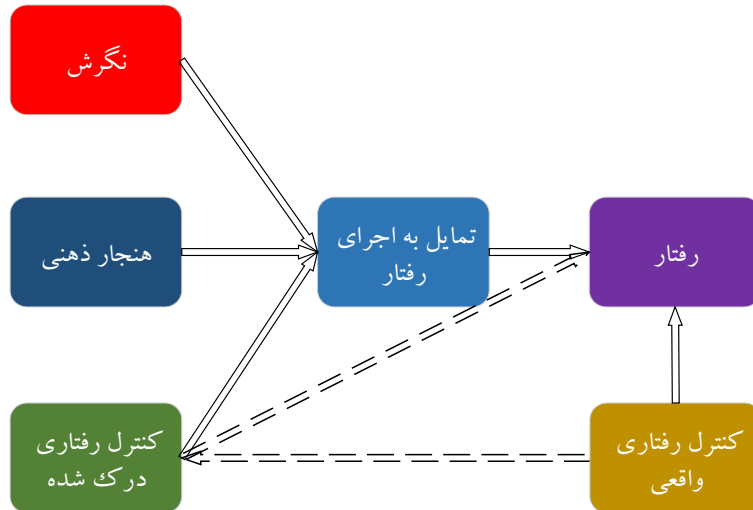
<sup>5</sup> Attitude  
<sup>6</sup> Subjective Norm (SN)

احساس می‌کند [۹۶، ۹۷]؛ اما این تئوری از جهاتی دارای ایراد است، چرا که تمایل به انجام یک کار صرفاً باعث انجام یک فعالیت نمی‌شود بلکه عوامل دیگری نیز در این فرآیند دخیل خواهند بود. علاوه بر این، تئوری کنش‌موجه فرض می‌کند که فرد بر تصمیمات خود کنترل ارادی دارد. این درحالی است که عوامل مختلفی مانند کمبودهای شخصی فرد و سایر موانع بیرونی می‌توانند در عملکرد یک رفتار مورد انتظار اختلال ایجاد کنند.

به عبارت دیگر، اگر یک شخص تمایل به انجام یک رفتار داشته باشد، تنها در صورتی این تمایل نشان‌دهنده خود رفتار است که فرد بر تصمیم خود کنترل ارادی داشته باشد. در صورتی که بسیاری از رفتارها حداقل به چند عامل غیرانگیزشی مانند در دسترس بودن منابع برای انجام یک کار، سرمایه، مهارت و زمان بستگی دارند [۹۸].

بر این اساس، آجزن در سال ۱۹۹۱ تئوری رفتار برنامه‌ریزی شده را به عنوان یک تئوری جانشین تئوری کنش‌موجه توسعه داد. در واقع، نظریه کنش‌موجه حالت خاصی از تئوری رفتار برنامه‌ریزی شده است و زمانی رخ می‌دهد که احتمال موفقیت ذهنی حداکثر باشد یا به عبارت واضح‌تر، رفتار تحت کنترل ارادی باشد. بنابراین در مواقعی که احتمال شکست وجود دارد و کنترل ارادی فرد بر تصمیم‌گیری محدود شود، نظریه تئوری رفتار برنامه‌ریزی شده وارد عمل خواهد شد. تفاوت تئوری رفتار برنامه‌ریزی شده و کنش‌موجه در کنترل رفتاری درک شده است که بیانگر سختی و آسانی اجرای یک رفتار از دیدگاه یک فرد می‌باشد [۹۹].

بر اساس شکل ۱-۲، تئوری رفتار برنامه‌ریزی شده تمایل به انجام یک رفتار را تابع سه مشخصه فرض می‌کند. اولین مشخصه، نگرش در راستای رفتار است و به درجه‌ای که یک شخص، ارزیابی مطلوب یا نامطلوب از رفتار مورد نظر دارد باز می‌گردد. پیش‌بینی‌کننده دوم، یک عامل اجتماعی تحت عنوان هنجار ذهنی است که به فشار اجتماعی درک شده به منظور انجام یا عدم انجام رفتار باز می‌گردد. عامل سوم، درجه کنترل رفتاری درک شده است که به سختی یا آسانی درک شده از اجرای رفتار باز می‌گردد که فرض بر آن است که تجربه گذشته یا پیش‌بینی موانع را بازتاب می‌کند. در واقع، نگرش و هنجار ذهنی مطلوب‌تر در راستای رفتار و یا کنترل رفتاری درک شده بزرگ‌تر تمایل بیشتری به انجام یک رفتار را به ارمغان می‌آورد [۱۰۰].



شکل ۲-۱ چارچوب کلی تئوری رفتار برنامه‌ریزی شده (TPB)

مطالعات انجام شده در زمینه کاربرد تئوری رفتار برنامه‌ریزی شده را می‌توان در دو دسته مجزا جای داد. دسته اول پژوهش‌هایی هستند که با استفاده از نرم‌افزارهای آماری، انجام مصاحبات حضوری و پرکردن پرسش‌نامه به بررسی عوامل مؤثر در فرآیندهای تصمیم‌گیری کشاورزان می‌پردازند تا با شناسایی عوامل تأثیرگذار در محدوده مطالعاتی و شناخت ساختار اجتماعی محدوده، سیاست‌های کارآمدتری را اعمال کنند. همانطور که مطالعه کاستیلو<sup>۱</sup> (۲۰۲۰)، در چارچوب تئوری رفتار برنامه‌ریزی شده به بررسی عوامل مؤثر بر رفتار کشاورزان در راستای استفاده از تکنولوژی‌های نوین آبیاری پرداخته است. با توجه به ضعف تئوری رفتار برنامه‌ریزی شده در مد نظر قرار دادن اثر محیط کشاورزان و تعاملات آن‌ها با جامعه، این مطالعه اثر پارامتر سرمایه اجتماعی را به عنوان معیاری برای مشخصه‌سازی رابطه بین فرد و محیط‌زیست مورد بررسی قرار داد. جمع‌آوری اطلاعات در این تحقیق با انجام مصاحبات حضوری و طراحی پرسش‌نامه صورت گرفت و صحت فرضیات با توسعه معادلات ساختاری سنجیده شد. شاخص‌های مورد بررسی شامل شاخص برازش مقایسه‌ای<sup>۲</sup> (CFI) برابر با ۰/۹۶، شاخص تاکر-لوئیس<sup>۳</sup> (TLI) برابر با ۰/۹۵ و ریشه میانگین مربعات<sup>۴</sup> (RMSEA) برابر با ۰/۰۱۴ بیانگر عملکرد مناسب مدل تجربی توسعه یافته بود. نتایج این پژوهش حاکی از آن بود که در راستای تشویق کشاورزان به اتخاذ سیستم‌های آبیاری نوین، نهادهای دولتی با ایجاد تغییرات بلندمدت در باورها و هنجارهای اجتماعی نتایج بهتری را به دست خواهند آورد. ضمن اینکه حتی بدون وجود مشوق‌های مالی از طریق تقویت اعتماد کشاورزان به نهادهای دولتی می‌توان رفتارهای صرفه‌جویانه‌تری را سبب شد. در نهایت تقویت باورهای کشاورزان و افزایش آگاهی نسبت به اهمیت محافظت از آب می‌تواند به پذیرش سیستم‌های آبیاری تحت فشار منجر گردد [۳۴].

<sup>1</sup> Castillo

<sup>2</sup> Comparative Fit Index

<sup>3</sup> Tucker-Lewis Index

<sup>4</sup> Root Mean Squared Error of Approximation



استفاده از تئوری رفتار برنامه‌ریزی شده توسعه یافته، با توجه به در نظر گرفتن مشخصه‌هایی در راستای بهبود عملکرد این نظریه در برخی مطالعات نیز دنبال شده است. در نظر نگرفتن ارتباطات عوامل با محیط اطراف، یکی از نقصان‌های این تئوری است که به منظور رفع آن، مطالعه تاما (۲۰۲۰) با افزودن دو مشخصه درک تهدیدات اقلیمی و دانش کشاورز نسبت به برنامه حفاظت کشاورزی، در راستای شناخت الگوهای رفتاری کشاورزان بنگلادش به منظور شرکت در برنامه حفاظت آب کشاورزی گام برداشته است. این پژوهش با انجام مصاحبه حضوری از ۲۲۰ کشاورز و با به کارگیری معادلات ساختاری توسعه یافت. بررسی شاخص‌های تناسب مدل بیانگر برازش مناسب مدل توسعه یافته است. نتایج این مطالعه حاکی از آن بود که اضافه کردن دو مشخصه دانش و تهدید اقلیمی می‌تواند قدرت پیش‌بینی و صحت تئوری رفتار برنامه‌ریزی شده در این محدوده را بهبود بخشد. ضمن اینکه، در این مطالعه دانش در زمینه برنامه حفاظت کشاورزی بیشترین تأثیر را بر نگرش کشاورزان داشت که نشان‌دهنده است که عوامل دولتی می‌بایست در راستای افزایش دانش کشاورزان نسبت به برنامه‌های حفاظتی اقدام کنند [۱۰۱].

دسته دیگری از پژوهش‌ها با بهره‌گیری از مطالعات اجتماعی انجام شده و در چارچوب تئوری رفتاری مورد بررسی به شناخت الگوهای رفتاری محدوده مورد نظر در قالب مدل‌های شبیه‌سازی نظیر مدل‌های عامل‌بنیان می‌پردازند تا نحوه تصمیم‌گیری افراد و عوامل بر مبنای الگوهای شناسایی شده تحت تأثیر شرایط مختلف را شناسایی کنند. در این زمینه، کوتیوا و ماکروپولوس در سال ۲۰۱۶ به‌عنوان پیش‌تازان این زمینه در چارچوب تئوری رفتار برنامه‌ریزی شده، برای اولین بار رفتار تقاضای آب شهری را در شهر آتن کشور یونان شبیه‌سازی کردند [۱۰۲]. تئوری رفتار برنامه‌ریزی شده در مدل‌های مدیریتی آب کشاورزی در شبیه‌سازی رفتار کشاورزان نیز در سازوکارهای متنوعی به کار رفته است.

به‌عنوان مثال، پولادی و همکاران (۲۰۱۹) در بررسی احیای دریاچه ارومیه به بررسی میزان تمایل کشاورزان به صرفه‌جویی در آب کشاورزی با به کارگیری تئوری رفتار برنامه‌ریزی شده در قالب مدل‌سازی عامل‌بنیان پرداختند تا تأثیرات فاکتورهای روان‌شناسی، اقتصادی و محیط‌زیستی بر رفتار کشاورزان ارزیابی گردد. در این مطالعه، کشاورزان حوضه زربینه رود بر اساس سطح تمایل به صرفه‌جویی به کشت محصولات پرآب‌بر، کم‌آب‌بر و یا محصولات با نیاز آبی متوسط می‌پردازند. کشاورزان در این تحقیق بر اساس فاکتورهای نظیر سن، سطح تحصیلات و مساحت زمین دسته‌بندی شدند. نتایج مدل نشان داد که رویکرد هیدرولوژیکی-اجتماعی ارائه شده می‌تواند به‌طور مؤثری برای شبیه‌سازی فرآیند تصمیم‌گیری کشاورزان استفاده شود؛ علاوه بر این، افزایش هزینه‌های زندگی، کشاورزان خرده‌مالک را مجبور می‌کند تا محصولات پرآب‌تری کشت کنند [۱۰۳].

نظریه رفتار برنامه‌ریزی شده با مدل‌های عامل‌بنیان در مدل‌های جفت‌شده کشاورزی-هیدرولوژیکی نیز کارایی و انعطاف‌پذیری خود را نشان داده‌اند. به‌طوری‌که کسارگودو<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۲۱) از این چارچوب برای بررسی رفتار

<sup>1</sup> Kasargodu

کشاورزان در استفاده از نوارهای فیلتر رویشی در کاهش افت کیفیت خاک و حفاظت از منابع آبی موجود در حوضه رودخانه لارکی<sup>۱</sup> در کشور شیلی استفاده کردند. در این پژوهش به منظور توسعه کارایی مدل رفتاری سه مشخصه تمایل رفتاری، دانش و ویژگی‌های اخلاقی به ساختار اصلی افزوده شده است. بر اساس نتایج می‌توان اذعان داشت که مشخصه‌های افزوده شده به ساختار تئوری اجتماعی اثر مهمی بر مدل‌سازی تمایلات کشاورزان برای استفاده از نوارهایی رویشی داشت. همچنین، مطابق با مصاحبات انجام شده، نتایج بیانگر این بود که انتخاب عرض نوار رویشی نه تنها به معیار سودمندی و کاهش افت کیفیت خاک بستگی دارد بلکه تا حد زیادی به نوع رفتار کشاورزان وابسته است [۱۰۴].

در نهایت، باید توجه داشت که استفاده از تئوری‌های روان‌شناسی به دلیل لزوم انجام مصاحبات حضوری و انجام آزمون‌های آماری زمان‌بر می‌باشد. بر این اساس، مطالعه هیون<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۱۹) در راستای کاهش زمان انجام مصاحبه‌ها و توزیع پرسش‌نامه در استفاده از تئوری‌های روان‌شناسی، رفتار کشاورزان را با استفاده از استنتاج بیزی<sup>۳</sup> و مدل تلفات-هزینه<sup>۴</sup> با الهام از تئوری رفتار برنامه‌ریزی شده در یک مدل عامل‌بنیان در حوضه رودخانه سن خوان<sup>۵</sup> در نیومکزیکو<sup>۶</sup> واقع در ایالات متحده شبیه‌سازی کردند. پژوهش آن‌ها چهار هدف شامل: (۱) استفاده از مدل عامل‌بنیان-استنتاج بیزی<sup>۷</sup> برای کمی‌سازی تصمیم‌گیری کشاورزان با در نظر گرفتن پارامتر ریسک درک شده؛ (۲) بهبود عملکرد مدل در مقایسه با قوانین مرسوم رفتاری عوامل؛ (۳) استفاده از مدل جفت شده در ترکیب با شبیه‌سازی آب سطحی برای مدل‌سازی صریح حلقه‌های بازخوردی بین سیستم طبیعی و انسانی و (۴) امتحان کردن مدل برای سناریوهای مختلف را دنبال می‌کرده است. نتایج این مطالعه نشان داد که اکثر عوامل در حوضه ریسک‌گریز هستند و تغییر شرایط اقتصادی، رفتار مورد انتظار از عوامل را در دنیای واقعی به ارمغان می‌آورد؛ یعنی زمانی که افزایش سطح محصول گران‌تر یا ارزان‌تر باشد عوامل کمتر یا بیشتری این کار را انجام خواهند داد [۱۰۵].

## ۲-۶- جمع‌بندی پیشینه تحقیقات با تأکید بر جنبه‌های نوآوری تحقیق پیش‌رو

نادیده گرفتن اثرات انسان‌ساز در مدل‌های هیدرولوژیکی سنتی با توجه به اثرات مستقیم و غیرمستقیم عوامل انسانی در چرخه‌های هیدرولوژیکی در دوره کنونی موسوم به آن‌تروپوسین منجر به تولید سیاست‌های ناکارآمد در دنیای واقعی خواهد شد. در این راستا، مطالعات انجام شده در توسعه مدل‌های جفت شده انسان-آب گام مؤثری در راستای بهبود مدیریت یکپارچه منابع آبی تلقی می‌شوند. ویژگی‌های منحصر به فرد سیستم‌های پیچیده انسان-محیط زیست از جمله ناهمگونی‌های فضائی و زمانی، تعاملات و تکامل هماهنگ سیستم انسان و آب باعث شده تا مدل‌های مرسوم مدل‌سازی مانند ابزارهای شبیه‌سازی-بهینه‌سازی، مدل‌های اقتصادی و سایر مدل‌های مشابهی که از تنوع افراد صرف نظر کرده و نیز پیچیدگی‌های تصمیم‌گیری‌ها را ساده‌تر می‌کند، کارایی خود را از دست بدهند. در مقابل، مدل‌های عامل‌بنیان با

<sup>1</sup> Larqui river basin

<sup>2</sup> Hyun

<sup>3</sup> Bayesian inference

<sup>4</sup> Cost-loss

<sup>5</sup> San Juan River

<sup>6</sup> New Mexico

<sup>7</sup> Agent-Based modeling-Bayesian Inference (ABM-BI)

انعطاف‌پذیری در ایجاد عوامل خودمختار و ناهمگون در مطالعات بسیاری کارائی خود را در بررسی مسائل پیچیده نشان داده‌اند. بسیاری از مطالعات اولیه در توسعه مدل‌های عامل‌بنیان\_ هیدرولوژیکی از توسعه مدل‌های توده‌ای برای شبیه‌سازی منبع آب سطحی و یا آب زیرزمینی بهره برده‌اند. این درحالی است که بسیاری از پارامترهای هیدرولوژیکی، اجتماعی و فرهنگی مؤثر بر شبیه‌سازی رفتاری عوامل انسانی در دو بعد زمان و مکان ناهمگون هستند. بدین ترتیب، در پژوهش پیش‌رو با توسعه یک مدل توزیعی از آبخوان محدوده اصفهان\_برخوار و ایجاد یک اتصال دوسویه با مدل عامل‌بنیان سعی در بهبود کارائی مدل‌های توسعه‌یافته و در نظر گرفتن تاثیر شرایط فیزیکی آبخوان در فرآیند تصمیم‌گیری عوامل، دارد.

علی‌رغم آنکه شبیه‌سازی فرآیندهای تصمیم‌گیری و طراحی سیستم‌های اجتماعی در مدل‌های عامل‌بنیان همواره چالش برانگیز بوده، با این حال، توسعه تئوری‌های اجتماعی متنوع چارچوب کارآمدی را برای محققان در حوزه سیستم‌های هیدرولوژیکی\_اجتماعی فراهم کرده است. با این وجود، به دلیل زمان‌بر بودن انجام مطالعات اجتماعی و جمع‌آوری داده‌ها در توسعه این مدل‌ها، در برخی مطالعات از روش‌های ترکیبی در توسعه مدل تصمیم‌گیری انسان‌ها بهره برده‌اند. این پژوهش، با الهام از چارچوب تئوری رفتار برنامه‌ریزی‌شده ضرایب اجتماعی معادلات توسعه‌یافته را طی اجرای فرآیند کالیبراسیون مدل مشخص خواهد کرد که به نوبه خود دیدگاهی نوآورانه در راستای نحوه انجام کالیبراسیون مدل آب زیرزمینی عامل‌بنیان محسوب می‌گردد.

## فصل سوم

### روش تحقیق و چارچوب مدل پیشنهادی

#### ۳-۱- مقدمه

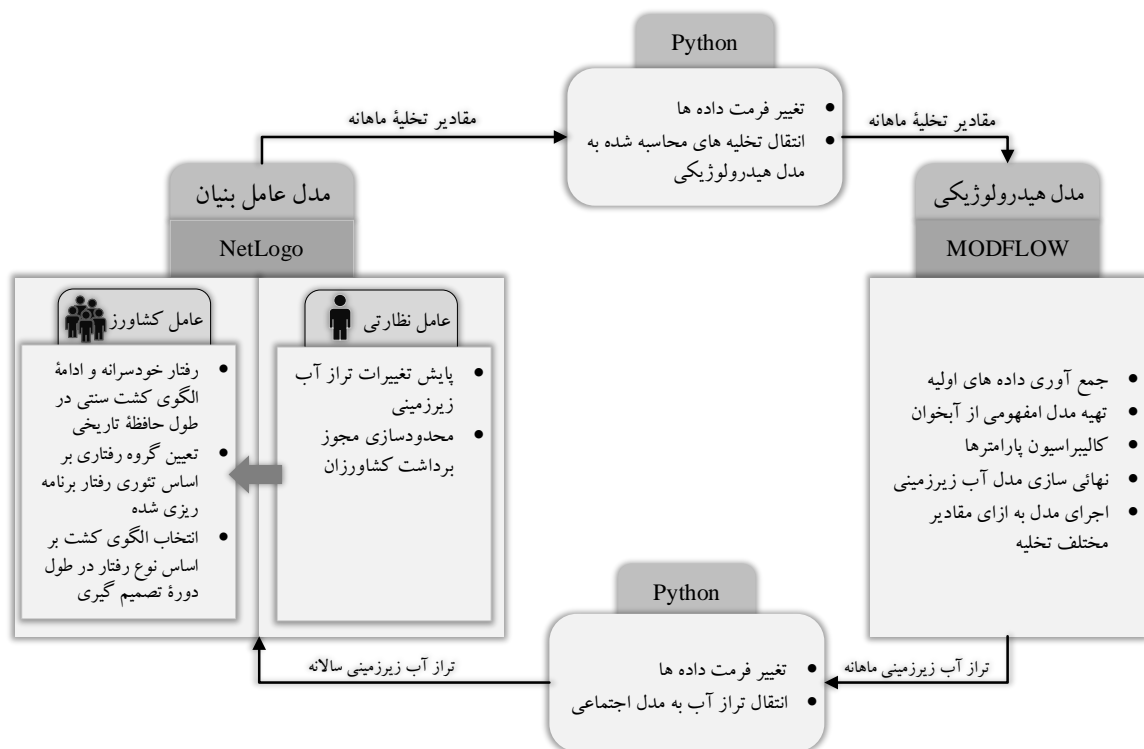
با بررسی تحقیقات پیشین انجام شده در حوضه مدیریت منابع آب زیرزمینی و تأکید بر نقاط قوت و ضعف هر یک می توان اظهار کرد که در نظر گرفتن عوامل انسانی در مطالعات گذشته بیشتر به صورت شرایط مرزی بوده است و تعاملات بین عوامل انسانی و منبع آبی مورد غفلت واقع شده است. با این وجود، تلاش هایی که در راستای بهبود این نقطه ضعف صورت گرفته نیز غیرقابل انکار است؛ اما توسعه یک مدل کاملاً توزیعی برای هر کدام از زیرمدل های اجتماعی و هیدرولوژیکی همواره هدف بهبود سیستم های هیدرولوژیکی\_ اجتماعی بوده است. بنابراین، در این تحقیق سعی بر آن است تا یک چارچوب هیدرولوژیکی\_ اجتماعی کاملاً توزیعی برای بررسی روند انتخاب الگوی کشت در محدوده آبخوان اصفهان\_ برخوردار توسعه یابد. باور بر این است که با شناسایی عوامل مؤثر بر رفتار آبیاری کشاورزان و شناسایی روند انتخاب الگوی کشت توسط کشاورزان زراعی بتوان سیاست های مدیریت آب زیرزمینی را هم سو و هم جهت با تمایلات و فاکتورهای مورد توجه کشاورزان در محدوده مطالعاتی تنظیم کرد.

بدین ترتیب، در فصل پیش رو به بررسی روش انجام پژوهش و توسعه مدل پیشنهادی پرداخته می شود. در این فصل، ابتدا به جهت بررسی شرایط آبخوان، مدل هیدرولوژیکی کاملاً توزیعی توسعه یافته و سپس مدل شبیه ساز فرآیند تصمیم گیری با الهام از تئوری رفتار برنامه ریزی شده تکامل می یابد. در نهایت، در راستای کالیبراسیون مدل تلاش شده تا دو مدل پیشنهادی به وسیله یک واسطه به یکدیگر متصل گردند. در این بخش، مفهوم سازی و نحوه توسعه هر یک از

مدل‌های ذکرشده در بخش‌های مختلف به تفصیل بررسی گردیده است. لازم به ذکر است که چارچوب پیشنهادی به شبیه‌سازی وضعیت هیدرولوژیکی آبخوان در طول گام‌های زمانی ماهانه، بین سال‌های ۹۰-۱۳۸۹ تا ۹۸-۱۳۹۷ می‌پردازد؛ ذکر این نکته نیز حائز اهمیت است که مدل تصمیم‌گیری به صورت سالانه اجرا می‌شود.

### ۳-۲- چارچوب مفهومی مدل اجتماعی-هیدرولوژیکی پیشنهادی

شبیه‌سازی رفتار تصمیم‌گیری عوامل انسانی در مجاورت یک سیستم آبی می‌تواند بر چرخه‌های هیدرولوژیکی محدوده مطالعاتی تأثیر بسزایی داشته باشد. در مقابل، عوامل انسانی نیز با مشاهده تغییرات شرایط حاکم بر منبع آب در دسترس، در راستای تطابق با شرایط حاضر تصمیمات خاصی را اتخاذ می‌کنند. بدین ترتیب، هر دو سیستم انسانی و منبع آبی بر یکدیگر اثرگذار خواهند بود. به جهت در نظر گرفتن این تعاملات بین دو سیستم مذکور، مطالعه حاضر یک مدل کاملاً **توزیعی هیدرولوژیکی** را با یک **مدل عامل‌بنیان** برای شبیه‌سازی الگوها و ساختار رفتاری کشاورزان زراعی محدوده اصفهان-برخوار **متصل** می‌کند. در شکل ۱-۳ ساختار کلی پیشنهادشده در این پژوهش و نحوه ارتباطات مدل‌های توسعه یافته نمایش داده شده است.



شکل ۱-۳ چارچوب کلی مدل پیشنهادی و نحوه ارتباط زیرمدل‌ها

این مسئله دو نوع عامل نهاد نظارتی و کشاورزان زراعی را در تعامل با یکدیگر و منبع آب مورد بررسی، در نظر می‌گیرد. در فرآیند شبیه‌سازی، در ابتدا کشاورزان بدون مداخله خارجی از سوی عوامل نظارتی به کشت محصولات

بر اساس دوره تاریخی می‌پردازند و وارد حلقه تصمیم‌گیری نمی‌شوند. دلیل در نظر گرفتن این بازه زمانی ایجاد افت محسوس آب زیرزمینی و کالیبراسیون شرایط اولیه مدل، شامل الگوی کشت اولیه کشاورزان و تراز آب زیرزمینی است. با گذر از دوره تاریخی پنج‌ساله، عوامل نظارتی وارد عمل می‌شوند و تراز شبیه‌سازی شده در چاه‌های بهره‌برداری را رصد می‌کنند. با بررسی میزان افت آب زیرزمینی در چاه‌های بهره‌برداری، میزان آب در دسترس از چاه‌ها برای هر کشاورز بر اساس عملکرد او در طول دوره تاریخی محدود می‌شود. در این مطالعه، با توجه به توسعه مدل توزیعی میزان محدودیت در چاه‌ها در بعد مکان بر اساس وضعیت تراز آب زیرزمینی برای هر عامل متفاوت در نظر گرفته می‌شود تا ناهمگونی خصوصیات و شرایط تصمیم‌گیری کشاورزان به‌خوبی در نظر گرفته شود. با مشخص شدن میزان محدودیت کشاورز در بهره‌برداری از آب زیرزمینی، کشاورزی که نماینده و تصمیم‌گیرنده نحوه عملکرد هر چاه است، باید با توجه به ویژگی‌های شخصی خود در مورد الگوی کشت سال پیش‌رو تصمیم‌گیری کند. با ورود به دوره چهارساله تصمیم‌گیری، کشاورزان می‌بایست بر اساس روحیات و ویژگی‌های شخصی خود و برآورد میزان محدودیت در مصرف آب در مورد کشت موردنظر خود برای سال آینده تصمیم‌گیری کنند. این فرآیند تا اتمام سال چهارم دوره تصمیم‌گیری ادامه می‌یابد و در هر سال مقادیر محدودیت برداشت آب زیرزمینی و سایر پارامترهای پویا به‌روزرسانی می‌شوند تا در فرآیند تصمیم‌گیری و گروه‌بندی رفتار کشاورز در سال بعد در نظر گرفته شوند.

تصمیم‌گیری کشاورزان بر اساس نوع گروه رفتاری که با توجه به خصوصیات فردی و روان‌شناسی آن‌ها در چارچوب تئوری رفتاری تعیین می‌شود، صورت می‌گیرد. خصوصیات کشاورزان در این مطالعه بر اساس گزارشات اجتماعی موجود و مصاحبات انجام‌شده در مطالعات پیشین که بخشی از آن‌ها بر اساس محدوده مطالعاتی در ادامه بررسی می‌شود، جمع‌آوری شده است. بر این اساس، با الهام از تئوری رفتار برنامه‌ریزی شده، کشاورزان در چهار گروه رفتاری تقسیم‌بندی می‌شود که هر کدام ترجیحات و تمایلات خاص خود را دنبال می‌کنند.

### ۳-۳- چارچوب ریاضیاتی و الگوریتم انجام پژوهش

توسعه مدل هیدرولوژیکی در این پژوهش با استفاده از مدل توزیعی MODFLOW در نرم‌افزار GMS صورت گرفته است؛ چراکه یکی از ویژگی‌های مؤثر در تصمیم‌گیری کشاورزان تراز آب زیرزمینی و میزان آب در دسترس سال جاری خواهد بود که در نظر گرفتن مقادیر متفاوت این متغیر در بعد مکان اهمیت زیادی دارد. بنابراین، لازم است با استفاده از یک مدل توزیعی مانند MODFLOW تراز آب زیرزمینی در سلول‌های حاوی چاه‌های بهره‌برداری محاسبه گردد.

در توسعه مدل رفتاری، نرم‌افزارهای متعددی مانند NetLogo، Swarm، AnyLogic، Repast به‌جهت شبیه‌سازی مدل‌های عامل‌بنیان توسعه یافته‌اند. در این میان، نرم‌افزار Netlogo با توجه به قابلیت‌هایی همچون ارتباط با نرم‌افزارهای

جغرافیایی نظیر GIS و زبان‌های برنامه‌نویسی دیگر از جمله متلب<sup>۱</sup> و پایتون<sup>۲</sup>، محیط کاربردوستی<sup>۳</sup> را برای توسعه مدل‌های عامل‌بنیان فراهم کرده است. در این مطالعه به منظور شبیه‌سازی مدل اجتماعی از این نرم‌افزار استفاده به عمل آمده است. شایان ذکر است که این نرم‌افزار منبع باز بوده و با توسعه یک محیط مبتنی بر شبکه گسترده<sup>۴</sup> برای کاربران، محیط مناسبی برای ویرایش، اشتراک‌گذاری و توسعه کدهای نرم‌افزاری فراهم کرده است. ضمن اینکه زبان برنامه‌نویسی در نرم‌افزار Netlogo در مقایسه با سایر ابزارهای اشاره‌شده ساده‌تر<sup>۵</sup> می‌باشد و امکان توسعه مدل را برای کاربران تسهیل می‌کند.

یکی از مهم‌ترین نوآوری‌های مطالعه حاضر، اتصال تنگاتنگ و دوسویه دو نرم‌افزار MODFLOW و NetLogo می‌باشد. این امر با استفاده از یک زبان برنامه‌نویسی شیء‌گرا<sup>۵</sup> به نام Python دنبال شده است. با توجه به توسعه کتابخانه‌های متعدد، با کدنویسی در محیط برنامه‌نویسی پایتون، مقادیر تخلیه محاسباتی از نرم‌افزار NetLogo به نرم‌افزار MODFLOW منتقل می‌شود و در مقابل، مقادیر تراز آب زیرزمینی توسعه‌یافته به‌عنوان یک پارامتر به نرم‌افزار NetLogo منتقل می‌شود. مدل ریاضی چگونگی ارتباط بخش‌های مختلف مدل و قواعد هر زیربخش در شکل ۲-۳ نمایش داده شده و جزئیات فرمول‌ها و فرض‌های حاکم بر هر زیربخش در بخش‌های آینده آورده شده است. چارچوب ریاضی شرح داده‌شده در این بخش در محدوده مطالعاتی اصفهان-برخوار اعمال گردیده است. از آنجا که فرض‌ها و قوانین حاکم بر زیرمدل شبیه‌ساز رفتاری تنها مطابق با شرایط و ساختار اجتماعی-فرهنگی محدوده موردنظر توسعه یافته‌اند، در بخش‌هایی از این فصل به گزارش‌ها و داده‌های مرتبط با این حوضه استناد شده است تا دلیل استفاده از روابط و پارامترهای خاص روان‌شناختی توجیه شود.

---

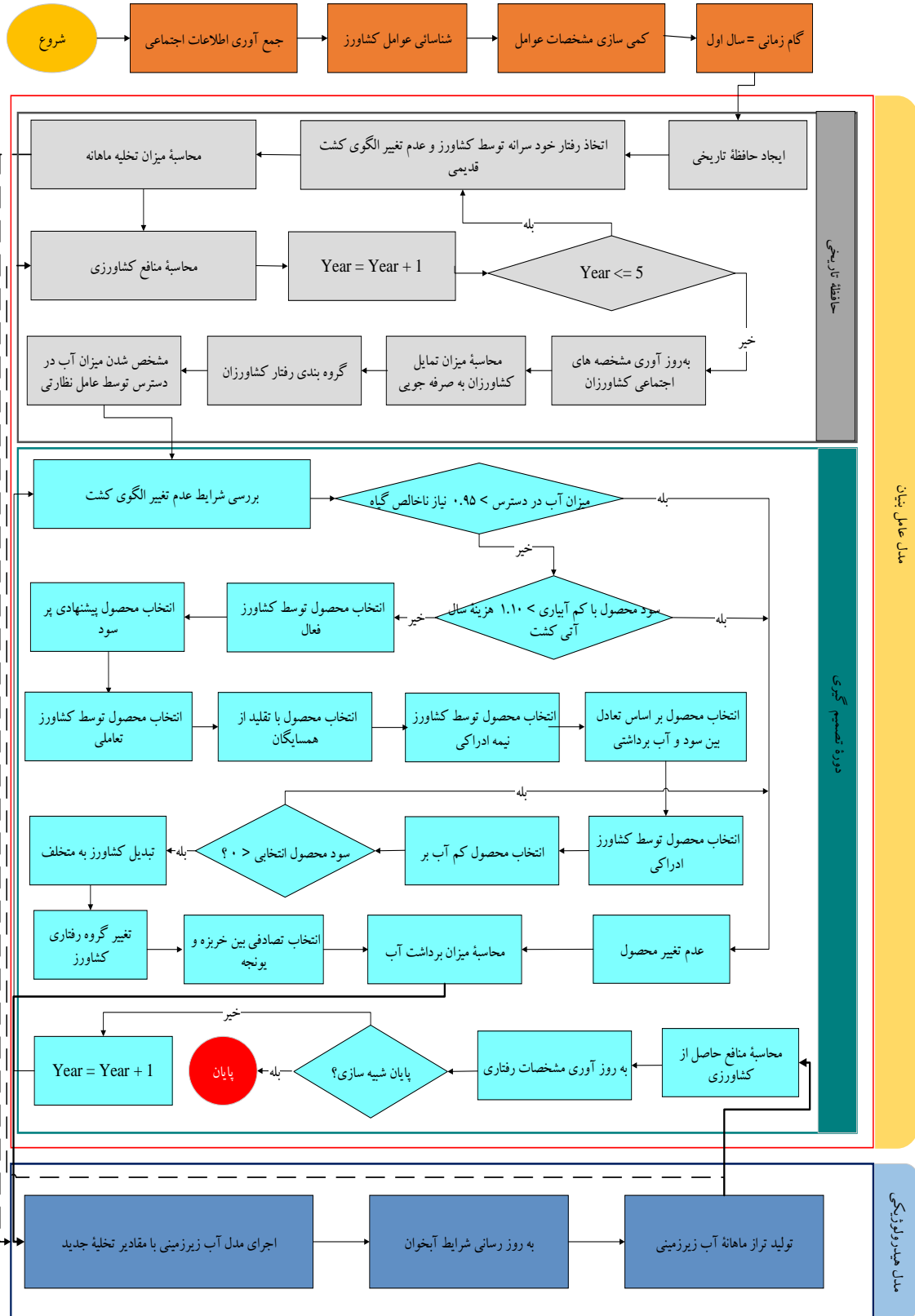
<sup>1</sup> MATLAB

<sup>2</sup> Python

<sup>3</sup> User Friendly

<sup>4</sup> Web-Based

<sup>5</sup> Object-Oriented language



شکل ۳-۲ فلوجارت چارچوب هیدرولوژیکی\_اجتماعی پیشنهادی



### ۳-۴- توسعه مدل هیدرولوژیکی

در توسعه سیستم‌های هیدرولوژیکی-اجتماعی لازم است یک جزء هیدرولوژیکی برای شبیه‌سازی منبع آب مورد بررسی در نظر گرفته شود؛ به دلیل آنکه تمرکز رویکرد انسان-آب بر تکامل هماهنگ<sup>۱</sup> دو زیرسیستم انسانی و هیدرولوژیکی است. از طرفی، یک شبیه‌ساز هیدرولوژیکی می‌تواند در ارزیابی نتایج محتمل از اجرای سیاست‌های مدیران در محدوده مد نظر کمک‌کننده باشد؛ باین حال، باید توجه داشت که بسیاری از پارامترها در یک سامانه هیدرولوژیکی مانند بارش، دما و رطوبت در هر دو بعد زمان و مکان متغیر هستند. بنابراین در شبیه‌سازی تعاملات متقابل بین زیرسیستم آبی و انسانی، بعد مکانی عوامل می‌تواند بر فرآیند تصمیم‌گیری آن‌ها تأثیرگذار باشد. بهبود دقت مدل‌های هیدرولوژیکی توسعه یافته می‌تواند به دستیابی به بینش عمیقی از فرآیندهای سیستم‌های آب-انسان<sup>۲</sup> کمک کند.

در این مطالعه، به منظور شبیه‌سازی زیرسیستم هیدرولوژیکی از یک مدل توزیعی در نرم‌افزار MODFLOW بهره‌گیری شده است. در تدوین مدل شبیه‌ساز ابتدا می‌بایست معادلات حاکم بر جریان آب زیرزمینی و روش‌های حل معادلات توسعه یافته ارزیابی گردد تا کارائی نرم‌افزار موردنظر در مطالعه فرآیندهای هیدرولوژیکی و شبیه‌سازی توزیعی سطح آب زیرزمینی مشخص شود.

### ۳-۴-۱- معادلات حاکم بر جریان آب زیرزمینی

گام اول در توسعه مدل هیدرولوژیکی، درک فیزیک مسئله و توسعه مدل ریاضیاتی جریان آب زیرزمینی است که در این راستا، ابتدا معادلات حاکم بر جریان بررسی می‌گردد. معادله حاکم بر جریان آب زیرزمینی در یک محیط متخلخل در نرم‌افزار MODFLOW بر مبنای ترکیب قانون دارسی<sup>۳</sup> و قانون بقای جرم<sup>۴</sup> تعیین می‌شود. این معادله به فرم یک معادله لاپلاس<sup>۵</sup> مطابق با معادله (۳-۱) خواهد بود [۱۰۶، ۱۰۷]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W = S_y \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1-3)$$

در این رابطه  $K_{xx}$ ،  $K_{yy}$  و  $K_{zz}$  بیانگر ضرایب هدایت هیدرولیکی در راستای محورهای  $x$ ،  $y$  و  $z$ ،  $h$  تراز پیزومتریک،  $W$  مقدار تغذیه و یا تخلیه از آبخوان،  $S_y$  ضریب آبدهی ویژه و  $t$  زمان می‌باشد.

<sup>1</sup> Co-evolution

<sup>2</sup> Water-Human

<sup>3</sup> Darcy's Law

<sup>4</sup> Conservation of mass

<sup>5</sup> Laplace Equation

حل معادله لاپلاس توسعه یافته به روش های عددی امکان پذیر است. در این روش ها محدوده به تعدادی سلول کوچک تر تقسیم و معادلات در محدوده سلول حل می شوند و مقدار بار هیدرولیکی در محدوده سلول های منفرد مشخص می شود. کاربردی ترین روش های حل عددی این معادلات دیفرانسیل، روش تفاضل محدود<sup>۱</sup> (FDM) و عناصر محدود<sup>۲</sup> (FEM) است. همانطور که پیش تر نیز اشاره شد، در کد MODFLOW از روش تفاضل محدود بهره برده شده است؛ معادلات توسعه یافته برای تقریب تراز آب در یک سلول مطابق با معادله (۲-۳) خواهد بود:

$$\begin{aligned}
 & CR_{i,j-1,k} (h_{i,j-1,k}^m - h_{i,j,k}^m) + CR_{i,j+1,k} (h_{i,j+1,k}^m - h_{i,j,k}^m) + \\
 & CC_{i-1,j,k} (h_{i-1,j,k}^m - h_{i,j,k}^m) + CR_{i+1,j,k} (h_{i+1,j,k}^m - h_{i,j,k}^m) + \\
 & CV_{i,j,k-1} (h_{i,j,k-1}^m - h_{i,j,k}^m) + CR_{i,j,k+1} (h_{i,j,k+1}^m - h_{i,j,k}^m) + \\
 & P_{i,j,k} h_{i,j,k}^m + Q_{i,j,k} = Sy_{i,j,k} (DEL R_j \times DEL R_i \times TICK_{i,j,k}) \frac{h_{i,j,k}^m - h_{i,j,k}^{m-1}}{t^m - t^{m-1}}
 \end{aligned} \quad (2-3)$$

در این معادله،  $h_{i,j,k}^m$  نشانگر سطح آب در سلول های  $i$ ،  $j$  و  $k$  در زمان  $m$ ،  $CV$ ،  $CR$  و  $CC$  هدایت هیدرولیکی بین گره های  $i$ ،  $j$  و  $k$  و یک گره مجاور،  $Q_{i,j,k}$  مجموع مقادیر تغذیه و تخلیه،  $Sy_{i,j,k}$  آبدهی ویژه،  $DEL R_i$  و  $DEL R_j$  عرض سلول در ستون  $i$  و  $j$ ،  $TICK_{i,j,k}$  ضخامت عمودی سلول  $i$ ،  $j$  و  $k$ ،  $t^m$  زمان در گام  $m$  است. در حالت ماندگار سمت راست معادله برابر با صفر قرار می شود و در حالت ناماندگار معادله مطابق با معادله (۲-۳) حل می شود.

### ۳-۴-۲- معرفی مدل MODFLOW

تاکنون نرم افزارهای متعددی مانند MODFLOW، PMWIN، GMS، PARFLOW و MODEL MUSE برای شبیه سازی آب های زیرزمینی و حل معادلات حاکم بر آنها به کار گرفته شده است. در این میان، مدل MODFLOW که در مطالعه حاضر به کار گرفته شده، یک برنامه رایانه ای است که جریان سه بعدی آب زیرزمینی در یک محیط متخلخل را با استفاده از روش تفاضل محدود شبیه سازی می کند [۱۰۸]. مدل شبیه ساز MODFLOW برای اولین بار در سال ۱۹۸۴ توسط مک دونالد<sup>۳</sup> و هاربا<sup>۴</sup> در سازمان زمین شناسی ایالات متحده<sup>۵</sup> در زبان برنامه نویسی فورترن<sup>۶</sup> توسعه یافت. نسخه دوم این مدل با عنوان MODFLOW-88 به منظور مدل سازی جریان یک، دو و سه بعدی مدولار در آبخوان های محصور، نیمه محصور و آزاد در حالت پایدار و گذرا توسط مک دونالد و هاربا توسعه یافت. نسخه سوم نرم افزار در قالب MODFLOW-96 توسعه یافت که دو افزونه MODFLOWP و MOC33D به منظور بهبود فرآیند

<sup>1</sup> Finite Difference Method (FDM)

<sup>2</sup> Finite Element Method (FEM)

<sup>3</sup> Mcdonald

<sup>4</sup> Harbaugh

<sup>5</sup> United States Geological Survey (USGS)

<sup>6</sup> Fortran

کالیبراسیون مدل و حل معادله انتقال املاح، به نسخه قبلی افزوده شده بود [۱۰۹]. در ادامه، نسخه MODFLOW-2000 با توسعه بسته‌های موجود در نرم‌افزار که قابلیت حل معادلات را به چندین روش متفاوت ارائه می‌کردند، امکانات بیشتر و دقت بهتری را در اختیار کاربران قرار داد.

در این پژوهش نیز شبیه‌سازی آبخوان در محیط GMS و با استفاده از کد MODFLOW-2000 انجام پذیرفت. برخی ویژگی‌های منحصر به فرد مدل MODFLOW منجر شده که این کد به‌طور گسترده‌ای در زمینه مدیریت منابع آب زیرزمینی به کار رود؛ از این ویژگی‌های برجسته می‌توان به موارد زیر اشاره کرد [۱۱۰]:

۱) شبیه‌سازی مادفلو آبخوان را به صورت **کاملاً توزیعی** در نظر می‌گیرد؛ به همین دلیل، پارامترهای مؤثر در شبیه‌سازی در بعد مکان متغیر هستند.

۲) حل معادلات جریان در این نرم‌افزار با روش **تفاضل محدود** صورت می‌گیرد.

۳) مدل مذکور قابلیت شبیه‌سازی آبخوان‌های **چندلایه و آبخوان‌های آزاد، تحت فشار و یا ترکیبی** را دارد.

۴) بسته‌های بسیار متنوعی در شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی مانند **تغذیه، تبخیر، تعرق و زهکشی** در آبخوان در نظر گرفته شده است.

به‌منظور **پیش‌پردازش و پس‌پردازش** مدل آب زیرزمینی از نرم‌افزار **GMS** به‌عنوان رابط گرافیکی استفاده می‌شود. این نرم‌افزار به کمک مدول‌های مختلف، ورودی‌های مدل را به فرمت مناسب تبدیل کرده و به کد MODFLOW ارسال کرده و در نهایت مقادیر خروجی را در قالب فایل‌های متنی تولید می‌کند. رابط گرافیکی GMS که در این مطالعه برای اجرای کد MODFLOW استفاده شده، فایل‌های خروجی و ورودی انبوه متنی را در قالب **HDF5** ذخیره می‌کند. برای خواندن داده‌ها از فایل‌های HDF5 لازم است تا ابتدا به فرمت متنی بازگردانی شوند که این کار در نرم‌افزار GMS با تولید فایل‌ها به فرمت **ASCII** انجام می‌پذیرد. در این مطالعه، به جهت ایجاد ارتباطات بین مدل MODFLOW و شبیه‌ساز اجتماعی NetLogo از این روش استفاده شده که در ادامه به تفصیل به توضیح آن پرداخته می‌شود.

### ۳-۴-۳- پارامترهای مؤثر در شبیه‌سازی آبخوان

در راستای شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی در کد MODFLOW لازم است برخی پارامترهای هیدروژئولوژی مانند **هدایت هیدرولیکی، ضریب ذخیره، مقادیر تغذیه و تخلیه، عمق سنگ بستر** و ... مورد مطالعه قرار گیرند. در ادامه این بخش به شرح برخی از این مشخصه‌ها پرداخته شده است.

#### ۳-۴-۳-۱- ضریب هدایت هیدرولیکی<sup>۱</sup> (K)

ضریب هدایت هیدرولیکی در آبخوان بر اساس قابلیت جریان یافتن و حرکت آب در فضای متخلخل درون خاک سنجیده می‌شود و عوامل متعددی مانند نوع خاک، تخلخل خاک، درصد رطوبت و ... بر این پارامتر مؤثر هستند. با توجه به

<sup>۱</sup> Hydraulic conductivity

داشتن ماهیت سرعت، واحد این پارامتر بر حسب متربرروز گزارش می‌شود. هدایت هیدرولیکی را می‌توان به صورت مستقیم (آزمون بار افتان و بار ثابت)، غیرمستقیم (بر اساس اندازه ذرات) و یا به صورت صحرائی و توسط آزمایش پمپاژ تعیین کرد. مقادیر مختلف ضریب هدایت هیدرولیکی با توجه به نوع خاک در جدول ۱-۳ گزارش شده است.

جدول ۱-۳ مقدار ضریب هدایت هیدرولیکی بر اساس نوع خاک [۱۱۱]

نوع خاک	ضریب هدایت هیدرولیکی (متر بر روز)
رسی سطحی خاک	۰.۰۱-۰.۲
خاک رسی عمیق	۱۰ <sup>-۸</sup> -۱۰ <sup>-۲</sup>
خاک لومی	۰.۱-۱
ماسه ریزدانه	۱-۵
ماسه دانه متوسط	۵-۲۰
ماسه درشت دانه	۲۰-۱۰۰
شن	۱۰۰-۱۰۰۰
شن و ماسه مخلوط	۵-۱۰۰
مخلوط شن و ماسه و رس	۰/۰۰۱-۰/۱

### ۳-۳-۴-۲- مقادیر تغذیه و تخلیه آبخوان<sup>۱</sup>

تغذیه آبخوان آبرفتی به روش‌های مختلفی از جمله نفوذ از بارندگی، نفوذ از جریان‌های سطحی، آب برگشتی مصارف مختلف، جریان‌های آب زیرزمینی ورودی و یا منابع تغذیه مصنوعی صورت می‌پذیرد. در مقابل، تخلیه از آبخوان نیز به روش‌هایی همچون تخلیه از چشمه، چاه و قنات برای استفاده در مصارف شرب، کشاورزی و صنعت و همچنین جریان‌های خروجی آب زیرزمینی و تبخیر از آبخوان صورت می‌پذیرد. هریک از منابع تغذیه و تخلیه در کد MODFLOW در قالب تعدادی پوشش به نرم‌افزار معرفی می‌گردند. به‌طور مثال، مقادیر تغذیه از بارش در پوشش recharge، منابع بهره‌برداری در قالب پوشش well و جریان‌های ورودی و خروجی آب زیرزمینی به‌صورت پوشش GHB<sup>۲</sup> به نرم‌افزار معرفی می‌شوند تا در فرآیند انجام محاسبات به کار گرفته شوند.

### ۳-۳-۴-۳- ضریب آبدهی ویژه<sup>۳</sup>

مقدار آبدهی ویژه یک پارامتر بی‌بعد بوده و برابر با نسبت حجم آب خارج‌شده از یک لایه آبدار با افت یک متری سطح ایستابی به سطح لایه آبدار با ارتفاع یک متر است؛ درحالت کلی، ضریب آبدهی ویژه بر اساس رابطه (۳-۳) محاسبه می‌شود.

$$S_y = \frac{V}{Ah} \quad (3-3)$$

<sup>1</sup> Source & Sink

<sup>2</sup> General Head Boundary

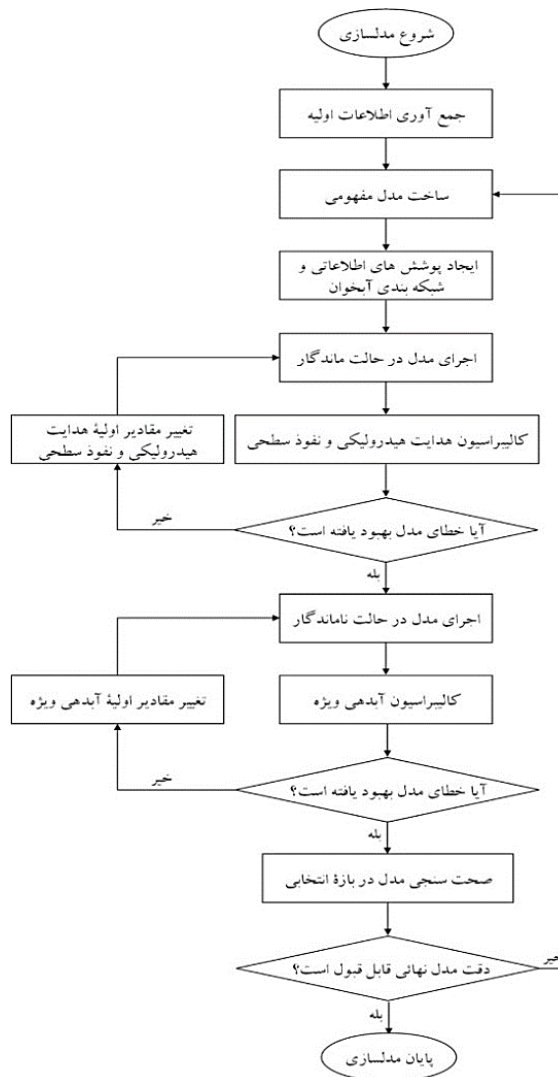
<sup>3</sup> Specific Yield ( $S_y$ )

در این رابطه،  $S_y$  مقدار آبدهی ویژه،  $V$  حجم آب استحصالی از یک لایه اشباع،  $A$  مساحت لایه اشباع و  $h$  ارتفاع افت سطح ایستابی را نشان می‌دهد.

### ۳-۴-۴- طراحی و اجرای مدل هیدرولوژیکی

ایجاد مدل هیدرولوژیکی از یک سیستم آبی مستلزم اجرای مراحل مختلفی از جمله جمع‌آوری داده‌ها، طراحی مدل مفهومی، اجرای مدل ماندگار و ناماندگار و نیز کالیبراسیون مدل در هر مرحله بوده که بر اساس فلوچارت ارائه‌شده در شکل ۳-۳ قابل مشاهده است. اولین گام در توسعه مدل هیدرولوژیکی محدوده اصفهان-برخوار جمع‌آوری اطلاعات هیدروژئولوژیکی محدوده مطالعاتی شامل داده‌های چاه‌های مشاهداتی، بهره‌برداری و اکتشافی، داده‌های مرتبط با آزمایش‌های پمپاژ، گزارش بیلان و داده‌های هواشناسی محدوده می‌باشد. پس از جمع‌آوری داده‌ها نیاز است تا بر پایه اطلاعات موجود یک مدل مفهومی در نرم‌افزار MODFLOW توسعه یابد که تمامی اطلاعات اولیه لازم برای شبیه‌سازی از جمله: نقشه آبخوان مطالعاتی، موقعیت و تراز آب در چاه‌های مشاهداتی، موقعیت مکانی و میزان تخلیه چاه‌ها، میزان نفوذ از بارش در آبخوان، نوع جریان‌های ورودی و خروجی، داده‌های اولیه هدایت هیدرولیکی و تراز ارتفاعی سنگ کف را در بر می‌گیرد.

توسعه مدل هیدرولوژیکی در آبخوان در دو حالت ماندگار و ناماندگار صورت می‌گیرد. در حالت ماندگار فرض بر آن است که تغییرات ورودی و خروجی در یک گام زمانی کوتاه برابر با صفر است تا مقدار هدایت هیدرولیکی در آبخوان کالیبره گردد. از دیگر پارامترهایی که در این مرحله کالیبره می‌گردد، می‌توان به مقادیر تغذیه و تخلیه آبخوان بر اساس گزارش‌های بیلان موجود اشاره کرد. با کالیبراسیون مدل هیدرولوژیکی در حالت ماندگار، نوبت به مدل‌سازی در حالت ناماندگار می‌رسد. در این مرحله می‌بایست پارامترهای موجود در مدل مفهومی به تفکیک گام زمانی موردنظر به صورت ماهانه، فصلی یا سالانه به مدل وارد شوند. شایان ذکر است که در این مطالعه، حالت ناماندگار با در نظر گرفتن گام زمانی ماهانه شبیه‌سازی شد. در انتها، در حالت ناماندگار مقادیر آبدهی ویژه برای نزدیک کردن تراز آب زیرزمینی مشاهداتی و محاسباتی کالیبره می‌شود.



شکل ۳-۳- فلوجارت روند شبیه سازی آب زیرزمینی در نرم افزار MODFLOW

### ۳-۵- توسعه شبیه‌ساز اجتماعی عامل بنیان

انتخاب نوع محصول مورد کشت تأثیر بسزائی در مدیریت آب کشاورزی دارد؛ به طوری که در بسیاری از آبخوان‌های بحرانی کشور، اصلاح الگوی کشت یکی از اولویت‌های اقدامات در سازگاری با شرایط کم‌آبی است. بنابراین، درک نحوه رفتار کشاورزان در انتخاب الگوی کشت در بخش زراعی به‌عنوان بالاترین مصرف‌کننده منابع آب زیرزمینی از اهمیت بالائی برخوردار است. از آنجا که رفتار کشاورزان نیمه‌منطقی است، درک مشخصه‌های رفتاری و روان‌شناختی آن‌ها می‌تواند بینشی در راستای شبیه‌سازی فرآیندهای تصمیم‌گیری فراهم کند [۱۲].

کمی‌سازی و اندازه‌گیری مشخصه‌های رفتاری عوامل و در نظر گرفتن ناهمگونی این مشخصه‌ها یکی از چالش‌های مدل‌سازی عامل بنیان در زمینه تصمیم‌گیری انسان‌ها است [۱۳]. این امر که دو کشاورز در همسایگی یکدیگر با شرایط اقلیمی و فیزیکی یکسان، بر اساس تجربیات شخصی خود، توانائی‌های فردی، میزان سودجویی و سایر عوامل

تصمیمات متفاوتی در انتخاب الگوی کشت و نحوه بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی بگیرند، بدیهی است [۷]. از طرفی، نکته چالش برانگیزتر در مدیریت منابع آب به‌ویژه در بحث آب‌های زیرزمینی که مصداق بارزی از منابع مشترک بین بهره‌برداران مختلف می‌باشند، این است که کشاورزان در شرایط تنش آبی و بحران به‌جای تلاش در راستای بهبود شرایط منابع آب، خود را با مشکلات کمبود آب روبه‌روخامت تطبیق می‌دهند تا با هر قیمتی نیازهای خود را تأمین کنند [۸]؛ بنابراین، برای مشخص کردن منشأ این تناقض لازم است عوامل شکل‌دهنده رفتار بهره‌برداری کشاورزان شناسایی گردند تا امکان مدیریت جامع منابع آب فراهم شود [۸۲].

در این پژوهش سعی بر آن است که فرآیند تصمیم‌گیری کشاورزان زراعی به‌عنوان عوامل انسانی در انتخاب الگوی کشت بر اساس مشخصات روان‌شناختی و فردی در چارچوب مدل عامل‌بنیان شبیه‌سازی شود. بر همین مبنای کشاورزان با توجه به مشخصات فردی و نوع رفتار خود تلاش می‌کنند تا به اهداف خود از جمله دستیابی به سود اقتصادی، صرفه‌جویی در مصرف آب کشاورزی و یا تعادلی بین این دو هدف دست یابند. در این مطالعه تعداد عوامل شبیه‌سازی شده که شامل کشاورزان زراعی می‌باشد، برابر با ۱۷۲۴ است و از شبیه‌سازی رفتار سایر عوامل از جمله کشت باغی، صنایع، خدمات و شرب صرف نظر شده است. بنابراین، مقادیر برداشت از آب‌های زیرزمینی برای این عوامل بر اساس داده‌های تاریخی استخراج شده و فرض می‌شود که تمام نیاز آبی این عوامل تأمین می‌گردد. علاوه بر این، در این فرآیند یک عامل نظارتی نیز در نظر گرفته شده که در مدل عامل‌بنیان از لحاظ رفتاری شبیه‌سازی نمی‌شود، اما میزان محدودیت کشاورزان در برداشت از آب‌های زیرزمینی را بر اساس سطح آب زیرزمینی و مقدار تراز آب استاندارد مشخص می‌کند تا تعاملات بین سیاست‌گذاران و کشاورزان و نحوه بازخورد کشاورزان زراعی در مقابل تصمیمات مدیریتی را شبیه‌سازی کند. در پژوهش حاضر، با توجه به توسعه یک مدل کاملاً توزیعی میزان محدودیت برداشت و یا آزاد بودن کشاورز در انتخاب الگوی کشت بر پایه وضعیت تراز آب زیرزمینی در چاهی که کشاورز نماینده آن است، مشخص می‌شود.

### ۳-۵-۱- توسعه چارچوب تئوری رفتار برنامه‌ریزی شده

شبیه‌سازی رفتار عامل‌ها در مدل‌های عامل‌بنیان به روش‌های مختلفی صورت می‌گیرد. از جمله این روش‌ها می‌توان به قواعد «اگر... آنگاه...»، قوانین آستانه‌ای و معادلات دیفرانسیلی اشاره کرد [۱۳]. یک رویکرد رایج در توصیف رفتار افراد با در نظر گرفتن فاکتورهای روان‌شناسی-اقتصادی، نظریه رفتار برنامه‌ریزی شده است [۳۵]. در این تحقیق، تلاش شده تا با بهره‌گیری از اصول و فرض‌های حاکم بر این نظریه، میزان تمایل کشاورزان به کاهش آب مصرفی کشاورزی و به تبع رفتار اتخاذی آنان در انتخاب الگوی کشت محاسبه شود. پارامترهای مؤثر در اتخاذ یک تصمیم خاص توسط انسان‌ها اغلب با انجام مطالعات میدانی و تکمیل پرسش‌نامه‌ها طبقه‌بندی و بررسی می‌شود. هرچند، با توجه به زمان‌بر

بودن فرآیند انجام مصاحبه‌ها و تکمیل پرسش‌نامه‌ها [۱۰۵]، در مطالعه حاضر، با الهام از ساختار نظریه رفتار برنامه‌ریزی شده ضرایب موجود در مدل مفهومی توسعه یافته با رویکرد کالیبره‌محور مشخص می‌شود. با توجه به چارچوب تئوری رفتار برنامه‌ریزی شده، تمایل به انجام یک رفتار مشخص تابع سه پارامتر روان‌شناختی شامل نگرش<sup>۱</sup>، هنجار ذهنی<sup>۲</sup> و کنترل رفتاری درک شده<sup>۳</sup> است. نگرش در این تئوری به معنای ارزیابی کشاورز از نتایج مطلوب یا نامطلوب به دست آمده از اجرای یک تصمیم خاص می‌باشد. هنجار ذهنی عبارت است از میزان فشار اجتماعی که کشاورز در اثر انجام یک فعالیت مشخص درک می‌کند و کنترل رفتاری درک شده، سطح سختی یا آسانی انجام یک فعالیت مشخص بوده که در واقع منعکس کننده توانایی‌های فردی شخص در انجام یک عمل خاص می‌باشد [۹۹]. بر اساس مطالعات اجتماعی موجود و با بهره‌گیری از مصاحبه‌های به دست آمده از مطالعه‌های پیشین، مؤلفه‌های تأثیرگذار بر مشخصه تمایل به صرفه‌جویی در مصرف آب کشاورزی، در این مطالعه در جدول ۳-۱ گزارش شده است.

جدول ۳-۱ پارامترهای اجتماعی مؤثر در رفتار کشاورزان

مؤلفه‌های اجتماعی	پارامترهای فردی و روان‌شناسی	تغییر پارامتر نسبت به زمان
نگرش	سطح رفاه	متغیر
	اعتماد به مسئولین	ثابت
	تجربه کشاورزی	ثابت
هنجار ذهنی	سطح تحصیلات	ثابت
	سطح اهمیت و درک عواقب فرونشست	ثابت
	وضعیت آب زیرزمینی	متغیر
کنترل رفتاری درک شده	سن کشاورز	ثابت
	سطح تحصیلات	ثابت
	تجربه کشاورزی	ثابت
	سطح وابستگی معیشت به کشاورزی	ثابت

به‌عنوان اولین پارامتر اجتماعی، نگرش در این مطالعه وابسته به سه مؤلفه سطح رفاه، اعتماد به مسئولین و تجربه کشاورزی است. بر اساس تعریف نگرش که به معنای برداشت مثبت یا منفی کشاورز نسبت به یک اتفاق مشخص می‌باشد، عبارت‌هایی که بر مبنای اسناد اجتماعی و مصاحبه‌های از مطالعه‌های پیشین به درک عوامل سازنده نگرش منجر شده که مطابق با موارد زیر است:

الف) اهمیت سطح رفاه کشاورزان در نگرش آن‌ها نسبت به دستورات بالادستی:

<sup>1</sup> Attitude (A)

<sup>2</sup> Subjective Norm (SN)

<sup>3</sup> Perceived Behavioral Control (PBC)



(۱) بسیاری از کشاورزان منطقه سطح درآمد پائینی از کشاورزی موجود دارند و معیشت آن‌ها از این راه تأمین نمی‌شود؛ سطح درآمد پائین موجب انعطاف‌پذیری پائین عوامل در اجرای دستورالعمل‌های ابلاغی می‌شود [۷۶].

(ب) اهمیت اعتماد به مسئولین در نگرش کشاورزان:

(۱) بیشترین خسارت وارده به منطقه در نتیجه سیاست‌های نادرست وزارت نیرو در خصوص تخصیص آب به بالادست است [۱۱۲].

(۲) ۲۵ سال پیش برای تأسیس کانال آب پول دریافت شده است، اما فقط دو یا سه سال ابتدائی اجرای طرح به مردم منطقه آب دادند [۷۶].

(۳) لازم است نظر کشاورزان در تصمیم‌گیری‌ها پرسیده شود؛ در حالی که در وضعیت حاضر، یک نفر در استان تهران که سمت مدیریتی دارد بدون داشتن اطلاعاتی از منطقه تصمیم‌گیری می‌کند [۷۶].

(پ) اهمیت تجربه کشاورزی در شکل‌گیری نگرش کشاورزان:

(۱) کشاورزی سود اقتصادی چندانی ندارد، اما کشاورزان به دلیل تعلق خاطر به کشاورزی و اینکه مهارت دیگری ندارند این پیشه را ادامه می‌دهند [۷۶].

(۲) کشاورزان منطقه نیروهای کارآمد و مجربی هستند که دارای شهرت ملی می‌باشند؛ به طوری که با اتخاذ استراتژی‌های فردی، با وجود کاهش میزان آب دریافتی، افت تولید متناسب با میزان کاهش آب دریافتی نبوده است [۱۱۲].

با مشخص شدن عوامل تأثیرگذار در شکل‌گیری نگرش کشاورزان نسبت به تغییر الگوی کشت و کاهش مصرف آب، بزرگی پارامترهای مشخص شده بین اعداد صفر و یک که به ترتیب نشان‌دهنده کمترین و بیشترین مقدار هستند، سنجیده می‌شود. در این پژوهش، سطح رفاه کشاورزان بر اساس معادله (۳-۴) نسبت به سایر کشاورزان ارزیابی گردیده و نحوه محاسبه میانگین درآمد در واحد سطح برای آن‌ها در رابطه (۳-۵) آورده شده است. در معادله یادشده، ابتدا میانگین سود در واحد سطح برای تمامی کشاورزان محاسبه شده و سپس با بی‌بعدسازی مقدار درآمد نسبت به سطح بر مبنای وضعیت درآمد هر کشاورز نسبت به کل کشاورزان منطقه مطالعاتی، پارامتر سطح رفاه هر کشاورز با مقداری بین صفر و یک مشخص می‌شود.

$$TPA_t = \frac{\sum_{i=1}^N \text{Income} / \text{Area}_{k,t}}{N} \quad \forall k \in \{1, \dots, N\}, t \quad (4-3)$$

$$WL_{k,t} = \frac{TPA_t - (\text{Income}/\text{Area})_{k,t}}{\text{Max}(\text{Income}/\text{Area})_t - \text{Min}(\text{Income}/\text{Area})_t} \quad \forall k \in \{1, \dots, N\}, t \quad (5-3)$$

در روابط یادشده،  $TPA$  میانگین درآمد در واحد سطح (ریال بر هکتار) در گام زمانی  $t$   $Income/Area$  درآمد خالص عامل کشاورز  $k$  در گام زمانی  $t$ ،  $Max (Income/Area)_t$  حداکثر مقدار درآمد در واحد سطح در گام زمانی  $t$  و  $Min (Income/Area)_t$  حداقل مقدار درآمد در واحد سطح در گام زمانی  $t$  می‌باشد.

مقدار سایر پارامترهای روان‌شناختی شامل اعتماد به مسئولین و تجربه کشاورزی عوامل، با استفاده از یک تابع نرمال تولید اعداد تصادفی<sup>۱</sup> در نرم‌افزار NetLogo تعریف می‌شود. در تعریف این مقادیر با توجه به وجود ارتباط بین گروه سنی کشاورز با تجربه کشاورزی و اعتماد به مسئولین بر مبنای پرسش‌نامه‌ها و مصاحبه‌های حاصل شده از پژوهش ذوالفقاری و احمدی ۱۴۰۰، مقادیر تجربه کشاورزی و اعتماد به مسئولین برای کشاورزان مسن‌تر بیشتر در نظر گرفته شد؛ به طوری که در تابع اعداد تصادفی، میانگین تعریف شده برای افراد مسن‌تر بیشتر از سایر گروه‌های سنی بوده و در بازه بین اعداد صفر تا یک تعریف می‌شود [۷۶]. با تعریف مؤلفه‌های مؤثر در محاسبه نگرش کشاورزان، مقدار پارامتر نگرش بر اساس رابطه (۶-۳) محاسبه می‌شود.

$$A = \sum_{i=1}^n b_i e_i \quad (6-3)$$

در رابطه بالا،  $b_i$  باور  $i$  ام تأثیرگذار در نگرش کشاورز و  $e_i$  میزان احتمال بروز نتیجه خاصی از باور  $i$  ام است. در این مطالعه مقدار احتمال نسبت به نتیجه خاص حاصل از یک باور نگرشی برای تمامی پارامترهای مؤثر یعنی اعتماد به مسئولین، سطح درآمد و تجربه کشاورزی به طور یکسان در نظر گرفته می‌شود. در واقع، از آنجا که مقدار کمی سازی شده برای هر یک از عوامل مؤثر بین صفر تا یک است، مقدار نهائی نگرش نیز میانگینی از مقادیر پارامترها و برابر با عددی در همین بازه گزارش می‌شود. در این رابطه، هر چه مقدار سه مؤلفه شناسائی شده بیشتر باشد، نگرش کشاورز نسبت به تغییر الگوی کشت و صرفه‌جویی در مصرف آب کشاورزی مثبت‌تر خواهد بود و تمایل بیشتری به انجام این رفتار خواهد داشت؛ بنابراین، این سه مشخصه در ارتباط مستقیم با نگرش و در نتیجه تمایل به اجرای رفتار هستند.

پس از محاسبه میزان نگرش، در گام بعدی میزان هنجار ذهنی عوامل کشاورز نسبت به صرفه‌جویی در مصرف آب کشاورزی سنجیده می‌شود. هنجار ذهنی به معنای فشاری است که عامل انسانی برای انجام دادن یا ندادن یک رفتار خاص احساس می‌کند و مؤلفه‌های مؤثر در شکل‌گیری آن در این پژوهش مواردی از جمله سطح تحصیلات، سطح اهمیت و درک عواقب فرونشست را در بر می‌گیرد. عبارت‌هایی که بر اساس اسناد اجتماعی و مصاحبه‌های پیشین به درک عوامل سازنده هنجار ذهنی منجر شده‌اند مطابق با موارد زیر است:

الف) تأثیر سطح تحصیلات در شکل‌گیری هنجار ذهنی کشاورزان:

<sup>1</sup> Random.normal()

۱) در این مطالعه فرض بر آن است که با افزایش سطح تحصیلات، کشاورزان درک بهتری از وضعیت آبخوان و لزوم صرفه‌جویی در مصرف آب کشاورزی دارند. بنابراین، فشار بیشتری در مدیریت مصرف آب احساس خواهند کرد.

ب) تأثیر سطح اهمیت و درک عواقب فرونشست در شکل‌گیری هنجار ذهنی کشاورزان:

۱) ذی‌نفعان این منطقه معتقدند که افت تراز آبخوان دشت برخوار که فرونشست اصفهان نیز تحت تأثیر آن است، بیش از آنکه وابسته به برداشت بی‌رویه از آبخوان باشد ناشی از نبود جریان دائمی در رودخانه زاینده‌رود است [۱۱۲].

پ) تأثیر وضعیت آب‌های زیرزمینی در شکل‌گیری هنجار ذهنی کشاورزان:

۱) در محدوده برخوار هیچ فرد کشاورز از نوع زراعی وجود ندارد که در چاه خود آب داشته باشد و از آن برای انجام فعالیت کشاورزی بهره‌برداری نکند [۷۶].

۲) وضعیت بحران آب جدی است؛ به‌طوری‌که در آینده هر دو بخش کشاورزی و صنعت واقع در این محدوده تعطیل خواهند شد [۷۶].

۳) مردم و کشاورزان ارزش آب را در شرایط کم‌آبی درک کرده‌اند و گمان می‌کنند که در آینده به آب احتیاج خواهند داشت، به همین دلیل در مدیریت مصرف سهم‌آبه خود دقت لازم به خرج می‌دهند [۷۶].

با مشخص شدن عوامل تأثیرگذار در شکل‌گیری هنجار ذهنی کشاورزان نسبت به تغییر الگوی کشت و کاهش مصرف آب، میزان پارامترهای مشخص شده بر اساس مقادیری بین صفر و یک سنجیده می‌شوند. در این حالت، صفر نشان‌دهنده کمترین و یک بیشترین مقدار خواهد بود. مقدار دو پارامتر روان‌شناختی سطح تحصیلات و سطح اهمیت و درک عواقب فرونشست در عوامل کشاورزی با استفاده از یک تابع نرمال تولید اعداد تصادفی در نرم‌افزار NetLogo تعریف می‌شود. در تعریف این مقادیر با توجه به وجود ارتباط بین گروه سنی کشاورز و سطح تحصیلات و به تبع ارتباط سطح تحصیلات و درک رابطه بین برداشت بی‌رویه از آبخوان و فرونشست در منطقه برخوار، بر مبنای پرسش‌نامه‌های به‌دست‌آمده از مطالعه ذوالفقاری و احمدی (۱۴۰۰) [۷۶]، مقادیر این دو مؤلفه برای کشاورزان مسن‌تر کمتر در نظر گرفته شده است. به نحوی که در تابع اعداد تصادفی، میانگین تعریف شده برای افراد مسن‌تر کمتر از سایر گروه‌های سنی بوده و در نهایت، مقادیر این دو مؤلفه در بازه بین صفر و یک تعریف می‌شود.

مؤلفه سوم در محاسبه هنجار ذهنی یعنی وضعیت آب زیرزمینی در آبخوان، بر اساس رابطه (۷-۳) محاسبه شده که از مطالعه آقائی و همکاران در سال ۲۰۲۱ برگرفته شده است. بر اساس این رابطه، عامل نظارتی مقادیر حداکثر تراز مجاز آب و تراز مناسب آب زیرزمینی در آبخوان را مشخص می‌کند تا وضعیت آب زیرزمینی در چاه متعلق به کشاورز مشخص شود [۱۱۱].

$$GS_{i,t} = \frac{WT_{max} - WT_{i,t}}{WT_{max} - WT_s} \quad (7-3)$$

در این رابطه،  $WT_{max}$  حداکثر تراز مجاز آب زیرزمینی،  $WT_s$  تراز مناسب آب زیرزمینی و  $WT_{i,t}$  سطح آب زیرزمینی برای عامل  $i$  ام در گام زمانی  $t$  و  $GS_{i,t}$  وضعیت برآورد شده از آب زیرزمینی برای عامل  $i$  ام در گام زمانی  $t$  است. بدین ترتیب، مقدار این پارامتر نیز به صورت عددی بین صفر و یک برآورد می‌شود. در این مطالعه مقدار  $WT_{max}$  برابر با ۱۸۰ متر و  $WT_s$  برابر با ۶ متر لحاظ شده است. با مشخص شدن مؤلفه‌های سازنده هنجار اجتماعی، مقدار عددی این پارامتر بر اساس رابطه (۳-۸) مشخص می‌شود:

$$SN = \sum_{j=1}^p n_j m_j \quad (۳-۸)$$

در این رابطه،  $SN$  نشان‌دهنده هنجار ذهنی،  $n$  اعتقاد هنجاری مرتبط با منبع تأثیر گذار  $j$  ام،  $m$  انگیزه شخص در پیروی از آن منبع و  $p$  تعداد کل عوامل مورد بررسی است. در پژوهش حاضر، انگیزه کشاورز در تبعیت از عوامل تأثیر گذار در شکل‌گیری هنجار ذهنی برای همه عوامل یکسان در نظر گرفته می‌شود. بنابراین می‌توان گفت که مقدار هنجار ذهنی برابر با میانگینی از فاکتورهای مؤثر ذکر شده خواهد بود. با توجه به محدوده مؤلفه‌ها مقدار نهائی هنجار ذهنی بین صفر تا یک ارزیابی می‌شود. هرچه مقدار دو مؤلفه شناسائی شده شامل سطح تحصیلات، درک اهمیت و عواقب فرونشست بیشتر باشد، کشاورز فشار بیشتری نسبت به تغییر الگوی کشت و صرفه‌جویی در مصرف آب احساس می‌کند و تمایل بیشتری به انجام این رفتار خواهد داشت؛ به همین سبب، این دو پارامتر در ارتباط مستقیم با هنجار ذهنی و تمایل به اجرای رفتار می‌باشند. در مقابل، هرچه پارامتر وضعیت آب زیرزمینی دارای مقدار بیشتری باشد، کشاورز فشار کمتری در صرفه‌جویی مصرف آب احساس می‌کند و لزومی به اجرای استراتژی‌های صرفه‌جویی نمی‌بیند. در نتیجه، پارامترهای هنجار ذهنی و تمایل به صرفه‌جویی با مؤلفه وضعیت آب زیرزمینی رابطه عکس دارند. بدین ترتیب، در محاسبه مقدار عددی هنجار ذهنی وضعیت آب زیرزمینی ابتدا از بیشینه مقدار این پارامتر که برابر با یک است کسر شده و سپس در رابطه (۳-۸) اعمال می‌گردد.

آخرین مؤلفه روان‌شناختی به‌منظور کمی‌سازی میزان تمایل کشاورزان به کاهش مصرف آب، کنترل رفتاری درک شده است. کنترل رفتاری درک شده عبارت است از میزان سختی یا آسانی که یک فرد از انجام یک رفتار مشخص احساس می‌کند. بر این اساس، افرادی که باور دارند توانائی‌ها و فرصت‌های بیشتری یا دشواری‌های کمتری دارند، کنترل رفتاری درک شده آن‌ها در برابر رفتار بیشتر خواهد بود. مؤلفه‌های سازنده کنترل رفتاری درک شده در این مطالعه مواردی همچون سن کشاورز، سطح تحصیلات، تجربه کشاورزی و سطح وابستگی معیشت به کشاورزی را در بر می‌گیرد. عباراتی که بر اساس اسناد اجتماعی و مصاحبه‌های در دسترس به درک عوامل سازنده هنجار ذهنی منجر شده‌اند مطابق با موارد زیر است:

الف) تأثیر سن کشاورز در شکل‌گیری کنترل رفتاری درک شده در عوامل کشاورز:

۱) در گذشته تمایل به انجام کار کشاورزی وجود داشت اما در حال حاضر **جوانان** منطقه تمایلی به کار کشاورزی ندارند و چاه‌ها را رها می‌کنند [۷۶].

۲) **مشکلات اجتماعی** در منطقه وجود دارد؛ به دلیل اینکه جوانان دیگر تمایلی به ادامه کار کشاورزی ندارند (پیرشدن جامعه کشاورزان) و به دلیل کمبود آب، برخی کشاورزان مجبور به مهاجرت به خوزستان و سایر مناطق شده‌اند که این امر سبب افزایش اعتیاد، **مشکلات خانوادگی** و حتی **خودکشی** شده است [۷۶].

۳) **مشکلات** منطقه شامل کمبود آب، کاهش تمایل به کار کشاورزی، مهاجرت به شهر و پیرشدن جامعه کشاورزان می‌باشد [۱۱۲].

ب) تأثیر **سطح تحصیلات** در شکل‌گیری کنترل رفتاری درک‌شده در عوامل کشاورزی:

۱) **سطح سواد جوانان بالا** رفته و نسل جدید تمایلی به ادامه کار پرزحمت و کم‌منفعت **کشاورزی** ندارد [۷۶].

پ) تأثیر **تجربه کشاورزی** در شکل‌گیری کنترل رفتاری درک‌شده در عوامل کشاورزی:

۲) کشاورزان اصفهان با اتخاذ **استراتژی‌های فردی** با وجود کاهش میزان آب دریافتی به گونه‌ای عمل کرده‌اند که افت تولید متناسب با میزان کاهش آب دریافتی نبوده است [۱۱۲].

ت) تأثیر **سطح وابستگی معیشت به کشاورزی** در شکل‌گیری کنترل رفتاری درک‌شده در عوامل کشاورزی:

۱) **منطقه گز** حدود ۳۰ هزار نفر جمعیت دارد که در حدود ۱۰ درصد از آن‌ها مهاجر هستند. حدود ۲۵ درصد از مردم را کشاورزان و تعداد زیادی از مردم را راننده‌های ماشین سنگین تشکیل می‌دهند. بقیه هم بیشتر کارگر بوده و **کشاورزان** منطقه در اغلب موارد **شغل دوم** ندارند [۷۶].

با مشخص شدن عوامل تأثیرگذار در شکل‌گیری کنترل رفتاری درک‌شده در کشاورزان نسبت به تغییر الگوی

کشت و کاهش مصرف آب، مقدار عددی پارامترهای مشخص شده بر اساس مقادیر بین **صفر و یک** سنجیده می‌شود.

در این حالت صفر نشان‌دهنده کمترین و یک بیشترین مقدار خواهد بود. مقدار چهار پارامتر روان‌شناختی شامل سن

کشاورز، سطح تحصیلات، تجربه کشاورزی و سطح وابستگی معیشت عوامل به کشاورزی با استفاده از یک تابع نرمال

از تولید اعداد تصادفی<sup>۱</sup> در نرم‌افزار NetLogo تعریف می‌شود. در تعریف مقدار سن کشاورز، درصد گروه سنی برای

کشاورزان بر اساس اطلاعات موجود مشخص شده است. لازم به ذکر است که در این مطالعه **سن کشاورزان** در طول

دوره شبیه‌سازی ثابت فرض می‌گردد. بدین ترتیب، بافت سنی کشاورزان به چهار گروه شامل ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱

تقسیم بندی می‌شود. گروه ۰/۲۵ نشان‌دهنده کشاورزان بین صفر تا ۲۵ سال، ۰/۵ گروه سنی ۲۵ تا ۵۰ سال، ۰/۷۵ گروه

سنی ۵۰ تا ۷۵ سال و عدد ۱ بیانگر کشاورزان ۷۵ تا ۱۰۰ سال می‌باشد. در راستای مشخص کردن دو پارامتر دیگر یعنی

**سطح تحصیلات** و **تجربه کشاورزی** بر اساس پرسش‌نامه‌های موجود، مشخص شد که بین گروه سنی کشاورز و مؤلفه

**سطح تحصیلات** و سن کشاورز با تجربه کشاورزی در منطقه بر خوار ارتباط وجود دارد و متغیر **سطح تحصیلات** با سن

<sup>1</sup> Random.normal()

رابطه عکس دارد؛ در مقابل، متغیر تجربه کشاورزی با سن کشاورز رابطه مستقیم دارد. بر اساس همین ارتباط، در تابع نرمال برای تولید اعداد تصادفی برای پارامتر تجربه کشاورزی، مقدار میانگین تعریف شده برای کشاورزان مسن بیشتر بوده، در حالی که در مقداردهی پارامتر سطح تحصیلات، میانگین تعریف شده در تابع برای کشاورزان مسن کمتر و برای کشاورزان جوان بیشتر بوده است. پس از محاسبه این پارامترها، مقدار عددی کنترل رفتاری درک شده بر اساس رابطه (۹-۳) محاسبه می شود.

$$PBC = \sum_{i=1}^n c_i p_i \quad (9-3)$$

در این رابطه،  $PBC$  بیانگر هنجار ذهنی،  $c$  باور کنترلی عامل تأثیرگذار  $i$  ام،  $p$  قدرت درک شده از عامل کنترلی خاص برای تسهیل و یا منع کردن اجرای رفتار و  $n$  تعداد کل مؤلفه‌های مورد بررسی است. در این مطالعه قدرت درک شده از مؤلفه‌ها در آسان یا سخت کردن اجرای رفتار برای کشاورز برای همه مؤلفه‌ها یکسان در نظر گرفته می شود. بنابراین می توان اذعان کرد که مقدار کنترل رفتاری درک شده برابر با میانگینی از فاکتورهای مؤثر ذکر شده خواهد بود. با توجه به محدوده مؤلفه‌ها که در بازه صفر و یک قرار دارند، مقدار نهائی کنترل رفتاری درک شده نیز بین صفر تا یک ارزیابی می شود.

هرچقدر مقدار دو مؤلفه شناسائی شده سطح تحصیلات و تجربه کشاورزی بیشتر باشد، کشاورز توانائی بیشتری در خود نسبت به تغییر الگوی کشت و صرفه جویی در مصرف آب کشاورزی احساس می کند و تمایل بیشتری به انجام این رفتار خواهد داشت. بنابراین، این دو پارامتر در ارتباط مستقیم با کنترل رفتاری درک شده و تمایل به اجرای رفتار هستند. در مقابل، هرچقدر پارامترهای سن کشاورز و وابستگی معیشت عامل به کشاورزی مقدار بیشتری را اتخاذ کند، کشاورز موانع بیشتری را در صرفه جویی مصرف آب احساس می کند و تمایل کمتری به تغییر شرایط و الگوی کشت کنونی خود دارد. در نتیجه، پارامتر کنترل رفتاری درک شده و تمایل به صرفه جویی با مؤلفه‌های سن کشاورزی و وابستگی معیشت به کشاورزی رابطه عکس دارند. پس در محاسبه مقدار کنترل رفتاری درک شده مقادیر این پارامترها از ۱ به عنوان بیشینه مقدار، کسر شده و در رابطه (۹-۳) جایگذاری می شود.

پس از تعیین مقادیر عددی هریک از مؤلفه‌های مؤثر در مشخصه‌های نگرش، هنجار ذهنی و کنترل رفتاری درک شده و محاسبه سه مؤلفه اجتماعی مؤثر در تئوری رفتار برنامه‌ریزی شده، با توجه به معادله ساختاری ارائه شده در رابطه (۱۰-۳)، مقدار نهائی میزان تمایل کشاورزان به صرفه جویی در آب کشاورزی محاسبه می شود:

$$BI_{i,t} = w_1 A_{i,t} + w_2 SN_{i,t} + w_3 PBC_{i,t} \quad (10-3)$$

در این رابطه،  $BI_{i,t}$  نشانگر میزان تمایل عامل کشاورز  $i$  ام در گام زمانی  $t$  ام،  $w_i$  وزن تجربی هر مؤلفه روان‌شناختی،  $A_{i,t}$  نگرش عامل  $i$  ام در گام زمانی  $t$  ام،  $SN_{i,t}$  مقدار عددی هنجار ذهنی کشاورز  $i$  ام در گام زمانی  $t$  ام و  $PBC_{i,t}$  مقدار عددی کنترل رفتاری درک‌شده کشاورز  $i$  ام در گام زمانی  $t$  ام می‌باشد. وزن‌های تجربی در این معادله برای همه عوامل کشاورز یکسان هستند و تنها پارامترهای اجتماعی براساس ویژگی‌های هر کشاورز در بعد مکان و زمان مقدار متمایزی خواهند داشت؛ چراکه مقادیر پارامترهای پویا در هر گام زمانی با اجرای مدل به‌روزرسانی می‌شوند. پارامترهای ایستا نیز در بعد مکان برای هر کشاورز بر اساس ویژگی‌های فردی مقدار متفاوتی را از آن خود خواهند کرد. بدین ترتیب، تلاش شده تا تأثیر ناهمگونی‌های فضائی و زمانی<sup>۱</sup> در تصمیم‌گیری‌های کشاورزان به‌خوبی منعکس شود. با محاسبه مقدار نهائی تمایل به صرفه‌جویی، مقدار این پارامتر عددی بین صفر و یک را نشان می‌دهد. در اینجا نیز عدد صفر و یک به ترتیب نشان‌دهنده کمترین و بیشترین میزان تمایل به صرفه‌جویی هستند.

از آنجا که در این مطالعه از رویکرد پرسش‌نامه‌ای به‌منظور محاسبه روابط و ضرایب در تئوری رفتار برنامه‌ریزی‌شده استفاده نشد، محاسبه ضرایب در معادله ساختاری ارائه‌شده در فرآیند کالیبراسیون مدل با به‌کارگیری یک الگوریتم تکاملی محاسبه می‌شود که در بخش مربوط به اتصال دو زیرمدل توسعه‌یافته با جزئیات ارائه گردیده است.

### ۳-۵-۲- فرآیند تصمیم‌گیری کشاورزان

پس از انجام محاسبات مربوط به میزان تمایل عوامل کشاورز به صرفه‌جویی در مصرف آب کشاورزی، کشاورزان وارد مرحله تصمیم‌گیری می‌شوند. در این فرآیند، کشاورزان می‌بایست در طول چهارسال به اتخاذ تصمیماتی در راستای کاهش مصرف آب کشاورزی و یا ادامه رویه فعلی خود بپردازند. بدین ترتیب، کشاورز در ابتدای شروع تصمیم‌گیری، به بررسی میزان آب زیرزمینی در دسترس بر مبنای محدودیت تعیین‌شده از جانب عامل نظارتی روی می‌آورد. بر اساس رابطه (۳-۱۱)، در صورتی که کشاورز در طول دوره تاریخی به‌خوبی عمل کرده و میزان محدودیتی جزئی در مصرف آب زیرزمینی (کمتر از ۵ درصد) اعمال شده باشد، کشاورز به کشت فعلی خود ادامه می‌دهد. در نتیجه، کشاورزانی که الگوی کشت خود را تغییر نمی‌دهند از فرآیند تصمیم‌گیری خارج شده و میزان آب برداشتی آنها مطابق با سال گذشته محاسبه خواهد شد.

$$\text{if } \{AW_t > 0.95 DW_{t-1}\} \rightarrow Q - out_{i,t} = DW_{t-1} \times CA \quad (۳-۱۱)$$

در این رابطه بالا،  $AW_t$  میزان آب در اختیار کشاورز در گام زمانی  $t$  ام،  $DW_{t-1}$  نیاز آب گیاه کشت‌شده در گام زمانی  $t-1$  ام،  $Q - out_{i,t}$  میزان برداشت آب توسط عامل  $i$  در گام زمانی  $t$  ام و  $CA$  مساحت زمین کشت‌شده است. در ادامه بر اساس رابطه (۳-۱۲)، کشاورزان با داشتن اطلاعاتی از قبیل میزان آب در دسترس، میزان کمبود آب باتوجه‌به الگوی کشت سال گذشته، هزینه‌های کاشت و قیمت فروش محصولات در سال فعلی و تخمینی از هزینه پمپاژ از چاه

<sup>۱</sup> Temporal & spatial heterogeneity

(با احتساب ۱۰ درصد افزایش هزینه پمپاژ نسبت به سال گذشته) به محاسبه میزان درآمد خالص دریافتی در صورت ادامه الگوی کشت فعلی می‌پردازند. در صورتی که مقدار سود خالص تخمین زده شده توسط کشاورز از ۱۰ درصد از هزینه‌های کشاورزی در سال آینده بیشتر باشد، کشاورز تمایل به ادامه کشت کنونی و عدم تغییر شرایط فعلی خود دارد. بنابراین میزان نیاز آبی در سال جاری برابر با نیاز آبی گیاه در سال گذشته منظور می‌گردد. نحوه محاسبه سود تخمینی برای کشاورز نیز مطابق با رابطه (۱۳-۳) می‌باشد:

$$if \{estimated - income_{i,t,x} > 1.1 Cost - Agri_{x,t+1}\} \quad (12-3)$$

$$\rightarrow DW_t = DW_{t-1}$$

$$estimated - income_{i,t,x} = [(P_{t,x} Y_{act,t,x} A_{i,t,x}) - (cost - agri_{t,x} A_{i,t,x}) - (1.1 Pumping - cost_{i,t-1,x})] \quad (13-3)$$

در رابطه‌های بالا،  $estimated - income_{i,t,x}$  درآمد تخمین زده شده توسط کشاورز برای کشت محصول X از کشت غالب محدوده در گام زمانی t ام،  $Cost - Agri_{x,t+1}$  هزینه‌های کشاورزی برای محصول X در گام زمانی  $t + 1$  ام،  $P_{t,x}$  قیمت فروش محصول X در گام زمانی t ام،  $Y_{act,t,x}$  عملکرد واقعی محصول X در گام زمانی t ام،  $A_{i,t,x}$  سطح کشت شده توسط عامل i ام در گام زمانی t ام برای محصول X و  $Pumping - cost_{i,t-1,x}$  هزینه پمپاژ عامل i ام در گام زمانی  $t - 1$  ام و برای محصول X می‌باشد. با بررسی شرایط عدم تغییر الگوی کشت، سایر کشاورزان که وارد فرآیند تصمیم‌گیری و کاهش مصرف آب کشاورزی خود می‌شوند، از میان سه محصول کم‌آب بر پیشنهادی شامل گندم، جو و ذرت علوفه‌ای انتخاب می‌کنند. در این مطالعه بر اساس آمار شرکت آب منطقه‌ای اصفهان، از الگوی کشت ثبت شده برای هر چاه بهره‌برداری، الگوی کشت اولیه کشاورزان تعریف می‌شود. با توجه به داده‌های تاریخی، الگوی کشت چاه‌ها بین یک تا سه نوع محصول متغیر است. در پژوهش پیش‌رو، تغییر الگوی کشت تنها برای نوع اول محصول اعمال می‌شود و از تغییر سایر محصولات کشت شده در زمین صرف نظر می‌گردد. علاوه بر این، از تغییر سطح زیر کشت و اعمال فرآیند نکاشت خودداری به عمل آمده است. حالت‌های ساده‌سازی شده برای کشت زمین‌های دومحصولی و سه‌مصولی در این مدل‌سازی مطابق با شکل ۳-۴ می‌باشد. فرآیند تغییر الگوی کشت برای زمین‌های چندمصولی تنها در قسمت اول زمین که در حالت‌های مختلف با رنگ نارنجی مشخص شده است، اتفاق می‌افتد. در نتیجه، تمامی محاسباتی که وابسته به سطح زیر کشت محصول هستند بر پایه درصد سطح زیر کشتی که در طول مدل‌سازی تغییر می‌کند، محاسبه گردیده‌اند. بنا بر همین فرض، نوع کشت سایر قسمت‌های کشت شده در زمین‌های چندمصولی در فرآیند تصمیم‌گیری کشاورزان ثابت است.



درصد کشت % ۵۰ =	درصد کشت % ۵۰ =	درصد کشت % ۲۵ =	درصد کشت % ۷۵ =	درصد کشت % ۳۳.۳ =	درصد کشت % ۳۳.۳ =	درصد کشت % ۳۳.۳ =	درصد کشت % ۱۶.۷ =	درصد کشت % ۳۳.۳ =	درصد کشت % ۵۰ =
زمین دو محصولی حالت اول	زمین دو محصولی حالت دوم	زمین سه محصولی حالت اول	زمین سه محصولی حالت دوم	زمین سه محصولی حالت اول	زمین سه محصولی حالت دوم	زمین سه محصولی حالت اول	زمین سه محصولی حالت دوم	زمین سه محصولی حالت اول	زمین سه محصولی حالت دوم

شکل ۳-۴ حالت‌های مختلف کشت زمین‌های چند محصولی در مدل‌سازی

پس از شروع فرآیند تصمیم‌گیری برای کشاورزان، در ابتدا متغیرهایی مانند میزان آب مورد نیاز برای هر الگوی کشت پیشنهادی و سود خالص دریافتی از کشت هر محصول کم‌آب بر پیشنهادی برای سال زراعی پیش‌رو محاسبه می‌شود. در این گام، کشاورزان به چهار گروه رفتاری تقسیم‌بندی شده که هر یک اولویت‌های متفاوتی در تصمیم‌گیری دارند. به این ترتیب، کشاورزان با میزان تمایل بین ۰ تا ۰/۲۵ جزو کشاورزان فعال دسته‌بندی می‌شوند که کمترین تمایل به صرفه‌جویی را دارند. کشاورزان تعاملی دارای میزان تمایل به صرفه‌جویی در بازه ۰/۲۵ تا ۰/۵ بوده و کشاورزان با میزان تمایل بین ۰/۵ تا ۰/۷۵ در دسته عوامل نیمه‌ادراکی قرار می‌گیرند. در نهایت، کشاورزان ادراکی که بیشترین تمایل به صرفه‌جویی در مصرف کشاورزی را دارا هستند، میزان تمایل بین ۰/۷۵ تا ۱ را از آن خود می‌کنند. در قسمت‌های بعدی چگونگی تصمیم‌گیری و ملاک انتخاب محصولات توسط کشاورزان در هر گروه به تفصیل آورده شده است.

### ۳-۵-۲-۱- کشاورزان فعال<sup>۱</sup>

اولین گروه در دسته‌بندی کشاورزان عوامل فعال هستند که کمترین تمایل به صرفه‌جویی و تغییر الگوی کشت در بازه صفر تا ۰/۲۵ را دارند. این دسته از عوامل را بیشتر کشاورزان با گروه سنی بالا و همچنین کشاورزان با وابستگی معیشت به کشاورزی بالا به دلیل نداشتن شغل و مهارت دیگر تشکیل می‌دهند. ضمن اینکه سطح رفاه این کشاورزان و درجه اعتماد آن‌ها به مسئولین نیز نسبت به سایر کشاورزان پائین‌تر است. به‌طور کلی این کشاورزان از لحاظ معیشتی دچار مشکل هستند که آن‌ها را وادار به تغییر الگوی کشت می‌کند، اما معیار تصمیم‌گیری آن‌ها بهبود معیشت خواهد بود. بنابراین، برای این دسته از عوامل حداکثرسازی سود اقتصادی حاصل از کشاورزی اولویت بالاتری نسبت به صرفه‌جویی در مصرف آب دارد. در نتیجه کشاورزان فعال مطابق با رابطه (۳-۱۴) در فرآیند انتخاب الگوی کشت برای سال زراعی پیش‌رو، ابتدا میزان سود تخمینی از سه محصول پیشنهادی شامل گندم، جو و ذرت علوفه‌ای را مقایسه کرده و الگوی کشت با بیشترین سود دریافتی را به عنوان الگوی کشت سال بعد خود انتخاب می‌کنند. فرآیند محاسبه میزان سود خالص بر آورده شده از کشت محصول مورد نظر بر اساس رابطه (۳-۱۵) صورت می‌گیرد.

<sup>۱</sup> Proactive

$$if \begin{cases} \max Assumed - profit_{i,t,k} = Assumed - profit_{i,t,1} \rightarrow DW_{t,k} = DW_{t,1} \\ \max Assumed - profit_{i,t,k} = Assumed - profit_{i,t,2} \rightarrow DW_{t,k} = DW_{t,2} \\ \max Assumed - profit_{i,t,k} = Assumed - profit_{i,t,3} \rightarrow DW_{t,k} = DW_{t,3} \end{cases} \quad (14-3)$$

$$Assumed - profit_{i,t,k} = [(P_{t,k} Y_{act,t,k} A_{i,t,k}) - (cost - agri_{t,k} A_{i,t,k}) - (1.1 Pumping - cost_{i,t-1,k})] \quad (15-3)$$

در روابط بالا،  $Assumed - profit_{i,t,k}$  میزان سود تخمین زده شده توسط کشاورز  $i$  در زمان  $t$  و برای محصول  $k$  بوده که محصول ۱ گندم، محصول ۲ جو و محصول ۳ ذرت می باشد و در نهایت،  $DW_{t,k}$  نیاز آبی در گام  $t$  برای محصول  $k$  در نظر گرفته می شود.

### ۳-۲-۵-۲- کشاورزان تعاملی<sup>۱</sup>

دسته دیگر کشاورزان در فرآیند تصمیم گیری، کشاورزان تعاملی هستند. این کشاورزان از نظر مقادیر عددی مؤلفه های روان شناختی در محدوده میانی بین ۰/۲۵ تا ۰/۵ قرار می گیرند. آن ها برای تصمیم گیری در زمینه تغییر یا عدم تغییر الگوی کشت، وضعیت همسایگان خود را بررسی می کنند. در این مطالعه، همسایگان هر عامل، کشاورزانی هستند که بر روی هشت سلول مجاور سلول حاوی کشاورز قرار می گیرند که در نرم افزار NetLogo به عنوان همسایگی نیومن<sup>۲</sup> شناخته می شود. بر این اساس، در صورتی که تعداد همسایگانی که الگوی کشت خود را تغییر نمی دهند بیشتر از کشاورزان با تغییر الگوی کشت باشد، کشاورزان تعاملی نیز حاضر به تغییر الگوی کشت خود نمی شوند. در مقابل، در صورتی که تعداد کشاورزان با وضعیت تغییر الگوی کشت بیشتر باشد، کشاورزان مطابق با گروه رفتاری همسایگان خود رفتار می کنند و از ملاک تصمیم گیری گروه رفتاری کشاورزان مجاور خود که بیشترین تعداد را به خود اختصاص می دهند، تقلید می کنند.

### ۳-۲-۵-۳- کشاورزان نیمه ادراکی<sup>۳</sup>

این گروه از کشاورزان با میزان تمایل به صرفه جویی برابر ۰/۵ تا ۰/۷۵، بیشتر سطح تحصيلات بالاتر و درک بهتری از ارتباط بین فرونشست و برداشت بی رویه از آبخوان دارند. ضمن اینکه با تجربه کشاورزی بالاتر و وابستگی معیشتی کمتر به کشاورزی، قادر به مدیریت آب کشاورزی با در نظر گرفتن معیارهایی به جز معیار اقتصادی خواهند بود. پارامترهای روان شناختی مؤثر در محاسبه میزان تمایل این کشاورزان به صرفه جویی در وضعیت معمولی و خوب قرار دارد. در پژوهش پیش رو، نحوه تصمیم گیری این کشاورزان بر مبنای ایجاد تعادلی از میزان آب مورد نیاز برای کشت محصول انتخابی و میزان سود استحصالی از الگوی کشت است. در واقع، این دسته از کشاورزان ضمن در نظر گرفتن

<sup>1</sup> interactive

<sup>2</sup> Von Neumann

<sup>3</sup> Bounded Rational

معیارهای اقتصادی، تلاش می کنند تا آب مصرفی خود را به گونه ای کنترل کنند که وضعیت آب زیرزمینی خود را و خیم تر نکنند؛ ارزیابی معیار محیط زیستی این مطالعه بر پایه رابطه (۱۶-۳) دنبال شده است.

$$CW_{i,t,k} = \frac{Allocated - water_{i,t}}{Water - demanded_{i,t,k}} \quad \forall i \in \{1, \dots, N\}, t, k \quad (16-3)$$

در این رابطه،  $CW_{i,t,k}$  نسبت بین نیاز آبی و آب موجود برای عامل  $i$  ام در گام زمانی  $t$  برای محصول  $k$ ،  $Water - demanded_{i,t,k}$  میزان نیاز ناخالص آب محاسباتی برای محصول پیشنهاد شده که از رابطه (۱۸-۳) مطابق با نیاز خالص آبی برای عامل  $i$  ام در گام زمانی  $t$  و گیاه  $k$  به دست می آید و در نهایت  $Allocated - water_{i,t}$  میزان سهم آبه کشاورز  $i$  ام در گام زمانی  $t$  می باشد. واضح است که هرچقدر پارامتر  $CW$  مقدار بیشتری داشته باشد، میزان صرفه جویی در آب زیرزمینی نیز بیشتر خواهد بود. در بررسی معیار اقتصادی نیز کشاورز مطابق با رابطه (۱۷-۳) عمل می کند. بر اساس این رابطه کشاورز ابتدا مقدار سود حاصل از کشت محصولات پیشنهادی را پیشاپیش بر اساس رابطه (۱۳-۳) محاسبه می کند و سپس بر مبنای برآورد سود و سود سال گذشته خود مقایسه ای را انجام می دهد.

$$EC_{i,t,k} = \frac{Assumed - income_{i,t,k}}{Total - income_{i,t-1}} \quad (17-3)$$

باتوجه به رابطه بالا،  $Assumed - income_{i,t,k}$  میزان سود تخمینی توسط کشاورز  $i$  ام در گام زمانی  $t$  برای محصول  $k$  و  $Total - income_{i,t-1}$  بیانگر میزان سود حاصل شده بر اثر کشاورزی برای عامل  $i$  ام در گام زمانی  $t-1$  می باشد. بر اساس رابطه اخیر، هرچقدر مقدار پارامتر  $EC$  بیشتر باشد، معیار اقتصادی مورد نظر کشاورز نیز بهتر برآورد می شود.

$$Water - demanded_{i,t,k} = \sum_{i=1}^M \frac{demand_{k,m} A_{i,t,k}}{IE} \quad (18-3)$$

در این رابطه،  $demand_{k,m}$  نیاز خالص آبی برای محصول  $k$  ام در گام زمانی ماهانه  $m$  و  $IE$  راندمان آبیاری می باشد. در نهایت، ایجاد تعادل بین دو معیار اقتصادی و محیط زیستی توسط کشاورز بر اساس رابطه (۱۹-۳) صورت می گیرد. هرچقدر مقدار پارامتر  $BC$  بیشتر باشد، نشانگر مقدار بیشتری از دو معیار اقتصادی و محیط زیستی به طور جداگانه است.

$$BC_{i,t,k} = EC_{i,t,k} CW_{i,t,k} \quad (19-3)$$

در نهایت هر کشاورز با محاسبه معیار تعادلی برای هر محصول در یک گام زمانی به انتخاب محصول نهائی مورد کشت می‌پردازد. بر این اساس هر یک از سه محصول گندم، جو و ذرت که معیار تعادلی بیشتری داشته باشند، توسط کشاورز به عنوان الگوی کشت نهائی انتخاب می‌شود.

### ۳-۵-۲-۴- کشاورزان ادراکی<sup>۱</sup>

آخرین گروه از عوامل که با عنوان کشاورزان ادراکی شناخته می‌شوند، دسته‌ای هستند که سطح پارامترهای روان‌شناختی آن‌ها در محدوده ایده‌آل قرار دارد. به عبارتی، میزان مؤلفه‌های مورد بررسی شامل سطح تحصیلات، سن، تجربه کشاورزی، اعتماد به مسئولان و سایر مؤلفه‌ها در محدوده بین ۰/۷۵ تا ۱ قرار دارد. این کشاورزان بیشترین تمایل به صرفه‌جویی در مصرف آب کشاورزی را دارند و از آنجا که از نظر رفاه و معیشت در وضعیت مناسبی قرار دارند با احساس تنش و کمبود آب به تغییر الگوی کشت و کاهش مصرف آب روی می‌آورند. کشاورزان ادراکی در فرآیند تصمیم‌گیری برای انتخاب الگوی کشت در ابتدا میزان آب مورد نیاز برای سه نوع الگوی کشت پیشنهادی را محاسبه می‌کنند. سپس، محصولی که کمترین میزان آب را نیاز دارد به عنوان الگوی کشت برای سال زراعی مد نظر انتخاب می‌شود؛ چگونگی محاسبه میزان آب مورد نیاز گیاه در رابطه (۳-۱۸) آورده شده است.

در نهایت با اتمام فرآیند تصمیم‌گیری کشاورزان در مورد محصول کشت‌شده، مقدار سود تخمینی حاصل از محصول انتخاب‌شده برای برخی از عوامل کشاورز با توجه به محدودیت بالا در برداشت آب زیرزمینی و لزوم کم‌آبیاری شدید محصول، منفی است. در نتیجه، این کشاورزان با مشاهده این امر که با کاهش سهم آب آن‌ها منافع آن‌ها در معرض خطر قرار می‌گیرد، دست به تخلف می‌زنند. در این مرحله دسته جدیدی از کشاورزان به عنوان کشاورزان متخلف<sup>۲</sup> در مدل‌سازی شناسائی می‌شوند. کشاورزان متخلف، در تصمیم‌گیری خود تجدید نظر می‌کنند و با برداشت غیرمجاز از آبخوان نسبت به رفع نیاز آب خود اقدام می‌کنند. بدین ترتیب، نوع محصول کشت‌شده این دسته از میان دو محصول پرآب بر یعنی خربزه و یونجه به طور تصادفی انتخاب می‌شود. در نظر گرفتن انتخاب این دو محصول توسط کشاورزان، بر اساس داده‌های تاریخی است که افزایش سطح زیر کشت این دو محصول با وجود پرآب بودن را نشان می‌دهد. با اتمام فرآیند تجدیدنظر کشاورزان متخلف و تصمیم‌گیری کشاورزان از بین چهار گروه رفتاری دیگر، میزان آب برداشت‌شده بر اساس محصول انتخابی محاسبه می‌شود. سپس، بر اساس میزان تخلیه ماهانه از چاه‌های بهره‌برداری و تغییر تراز آب زیرزمینی در شبیه‌ساز مادفلو، هزینه پمپاژ، هزینه کشاورزی و سود حاصل از فروش محصولات برای هر عامل کشاورز محاسبه می‌گردد. با به‌روز شدن وضعیت آب زیرزمینی، منافع فروش محصولات و هزینه‌های ناشی از فعالیت کشاورزی دوباره پارامترهای تئوری رفتاری به‌روز شده و فرآیند تصمیم‌گیری کشاورزان به ابتدای چرخه خود باز می‌گردد؛ نحوه محاسبه هزینه‌ها و سود ناشی از کشاورزی در بخش آتی به تفصیل ارائه شده است.

<sup>1</sup> Perceptive

<sup>2</sup> Offenders

## ۳-۵-۳- محاسبه منافع حاصل از کشاورزی

در طول فرآیند تصمیم‌گیری، کشاورزان با انتخاب یک نوع محصول برای کشت در سال زراعی جاری و انجام یک نوع فعالیت اقتصادی، متحمل هزینه‌هایی از جمله هزینه کشاورزی و هزینه پمپاژ می‌شوند. در مقابل این هزینه‌ها، کشاورزان با فروش محصولات کشت‌شده درآمدی را به دست می‌آورند. به‌طور کلی، درآمد خالص عوامل کشاورز بر اساس رابطه (۲۰-۳) با کسر مقادیر هزینه از درآمدها محاسبه می‌شود.

$$NetBenefit_{i,t,k} = Income_{i,t,k} - Cost_{i,t,k} \quad (20-3)$$

در این رابطه،  $NetBenefit_{i,t,k}$  بیانگر سود خالص کشاورز  $i$  ام در گام زمانی  $t$  حاصل از کشت محصول  $k$ ،  $Income_{i,t,k}$  بیانگر مقدار سود کشاورز  $i$  ام در گام زمانی  $t$  حاصل از فروش محصول  $k$  و در نهایت  $Cost_{i,t,k}$  نشان‌دهنده هزینه‌های کشاورز  $i$  ام در گام زمانی  $t$  و مرتبط با کشت محصول  $k$  می‌باشد. سود اولیه کسب‌شده در فعالیت کشاورزی بر اساس قیمت فروش محصولات و عملکرد محصول مطابق با رابطه ۳-۲۱ محاسبه می‌گردد.

$$Income_{i,t} = \sum_{k=1}^K P_{t,k} Y_{act,t,k} A_{i,t,k} \quad (21-3)$$

در رابطه فوق،  $Income_{i,t}$  مقدار درآمد حاصل از فروش محصولات برای کشاورز  $i$  ام در گام زمانی  $t$ ،  $P_{t,k}$  قیمت فروش محصول  $k$  در گام زمانی  $t$ ،  $Y_{act,t,k}$  عملکرد واقعی برای محصول  $k$  در گام زمانی  $t$  و  $A_{i,t,k}$  سطح کشت‌شده توسط کشاورز  $i$  ام در گام زمانی  $t$  و برای محصول  $k$  می‌باشد. همانطور که پیش‌تر نیز اشاره شد، زمین‌های کشاورزی بین یک تا سه محصولی هستند که در روابط یادشده مقدار  $k$  بر اساس تعداد محصولات کشت‌شده در زمین بین یک تا سه متغیر خواهد بود. از آنجا که مقدار عملکرد واقعی محصول در شرایطی که کم‌آبایی صورت می‌گیرد با عملکرد بیشینه محصول متفاوت است، در ابتدا می‌بایست میزان عملکرد واقعی محصول بر اساس رابطه (۳-۲۲) محاسبه شود.

$$Y_{act,t,k} = Y_{max,t,k} \prod_{m=1}^M \left( 1 - Ky_m \left( 1 - \frac{Allocated - water_m}{Demand_m} \right) \right) \quad (22-3)$$

در این رابطه،  $Y_{max,t,k}$  بیانگر عملکرد بیشینه محصول در گام زمانی  $t$  برای محصول  $k$ ،  $Ky_m$  بیانگر ضریب حساسیت به تنش آبی در گام زمانی ماهانه  $m$  ام،  $Allocated - water_m$  بیانگر میزان آب در دسترس کشاورز در گام زمانی  $m$  و در نهایت  $Demand_m$  بیانگر نیاز آبی محصول در گام زمانی  $m$  می‌باشد.

پس از محاسبه میزان درآمد حاصل از کشاورزی می‌بایست مقدار هزینه‌های مربوط به کشاورزی را نیز محاسبه کرد که بر اساس هزینه اولیه کشاورزی و هزینه پمپاژ است. هزینه اولیه فعالیت کشاورزی بر اساس رابطه (۲۳-۳) قابل محاسبه است:

$$Cost - Agri_{i,t} = \sum_{k=1}^K CA_{t,k} A_{i,t,k} \quad (23-3)$$

بدین ترتیب، مقدار  $Cost - Agri_{i,t}$  کل هزینه ناشی از فعالیت کشاورزی شامل کاشت، داشت و برداشت برای عامل  $i$  ام در گام زمانی  $t$  ام،  $CA_{t,k}$  هزینه ثابت تولید محصول  $k$  در گام زمانی  $t$  و  $A_{i,t,k}$  سطح کشت شده توسط کشاورز  $i$  ام در گام زمانی  $t$  و برای محصول  $k$  می‌باشد. محاسبه هزینه ناشی از پمپاژ آب از چاه بهره برداری با استفاده از رابطه (۲۴-۳) محاسبه می‌شود.

$$PC_{i,t} = \frac{9.8 \times 10^6}{3600\eta} \left( \sum_{m=1}^M Q_{out,m} \Delta h_m Pe_t \right) \quad (24-3)$$

در این رابطه،  $PC_{i,t}$  هزینه پمپاژ برای عامل  $i$  در گام زمانی  $t$ ،  $\eta$  راندمان پمپاژ،  $Q_{out,m}$  میزان آب تخلیه شده در گام زمانی ماهانه  $m$ ،  $\Delta h_m$  تغییرات سطح آب در طول بازه زمانی  $m$  و  $Pe_t$  قیمت برق در گام زمانی  $t$  می‌باشد.

### ۳-۶- اتصال مدل شبیه‌ساز رفتاری به مدل هیدرولوژیکی

با توسعه مدل‌های هیدرولوژیکی و عامل‌بنیان به‌طور مستقل، در این مرحله لازم است اتصال متقابلی به‌طور رفت‌وبرگشتی بین دو نرم افزار ایجاد شود تا ترازهای آب زیرزمینی شبیه‌سازی شده در نرم افزار MODFLOW به مدل عامل‌بنیان در نرم افزار Netlogo منتقل شده و به‌عنوان یک مشخصه برای عوامل کشاورز در نظر گرفته شود. در مقابل لازم است با انجام فرآیند تصمیم‌گیری در مدل اجتماعی و تعیین مقادیر تخلیه از چاه‌های بهره‌برداری بر اساس نیاز آبی محصول انتخابی، مقادیر تخلیه به‌شکل ماهانه به مدل شبیه‌ساز هیدرولوژیکی وارد شوند.

به‌منظور دستیابی به این هدف، از توسعه مدل‌های فراطبیعی بهره گرفته نشد؛ چراکه توسعه مدل کاملاً توزیعی در بعد مکانی از اهداف نوآورانه این مطالعه بوده است. این پژوهش با الهام از مطالعه مارک جکسا-روزن<sup>۱</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۹ با بهره‌گیری از یک زبان برنامه نویسی شیء‌گرا<sup>۲</sup> مانند پایتون به‌عنوان یک واسطه، اتصال مستقیم بین دو نرم افزار را محقق نموده است [۱۱۳]. باتوجه‌به وجود کتابخانه‌های متنوع در نرم‌افزار پایتون نظیر Flopy که برای اجرای

<sup>1</sup> Marc Jaxa-Rozen

<sup>2</sup> Object-Oriented

کد **MODFLOW** استفاده می‌شود و **Pynetlogo** که امکان اجرای کدهای نوشته شده در نرم‌افزار **Netlogo** را فراهم می‌کند، اتصال این دو مدل به خوبی امکان پذیر شده است.

کتابخانه Flopy به منظور اجرای کد MODFLOW از فایل‌های متنی توسعه یافته توسط نرم‌افزار **GMS** بهره می‌گیرد. نرم‌افزار **GMS** برای اجرای مدل شبیه‌سازی آب زیرزمینی، فایل‌هایی حاوی اطلاعات ورودی در فرمت **HDF5** تولید کرده که از میان فایل‌های تولید شده، پسوند **wel**. اطلاعات میزان تخلیه چاه‌های بهره‌برداری را نگهداری می‌کند. بنابراین، مقادیر تخلیه تولید شده در نرم‌افزار **Netlogo** با اجرای کدهای توسعه یافته در پایتون در فایل **wel**. قرار می‌گیرند. لازم به ذکر است با تغییر مقادیر تخلیه از آبخوان مقادیر آب برگشتی نیز تغییر خواهند کرد. این امر موجب تغییر مقادیر نفوذ از سطح که در فایل با پسوند **rch**. که حاوی اطلاعات مربوط به نفوذ آبخوان است، می‌شود. در این مطالعه، مقادیر آب برگشتی از میزان تخلیه محاسباتی کسر می‌شود تا از چنین پیچیدگی‌هایی جلوگیری شود. با تغییر مقادیر تخلیه لازم است مدل شبیه‌ساز آبخوان بار دیگر اجرا شود تا تغییرات تراز آب زیرزمینی بررسی گردد. بنابراین، کتابخانه **Flopy** از فایل با پسوند **nam**. که حاوی تمامی اطلاعات ورودی و خروجی مدل است استفاده می‌کند تا کد MODFLOW را برای شرایط جدید اجرا و مقادیر تراز آب به روزرسانی گرداند.

در نهایت، ترازهای تولیدی با استفاده از فایل‌های متنی به نرم‌افزار **Netlogo** معرفی می‌شوند. پس از اجرای مدل هیدرولوژیکی، در این گام اجرای کدهای توسعه یافته در **Netlogo** با استفاده از کتابخانه **Pynetlogo** صورت می‌گیرد. در واقع کدهای توسعه یافته در پایتون به عنوان رابط کاربری<sup>۱</sup> اصلی در این مدل عمل می‌کنند. به طور دقیق‌تر می‌توان گفت که مدل‌های توسعه یافته به عنوان زیربنایی برای توسعه کد پایتون به کار می‌روند و کاربر تنها از طریق نرم‌افزار پایتون کدهای مربوط را اجرا می‌کند. این امر پیچیدگی‌های اجرای چندین نرم‌افزار و مشاهده خروجی‌های حاصل از اجرای هر یک را کاهش می‌دهد که از نقاط قوت مدل توسعه یافته محسوب می‌شود.

### ۳-۷- کالیبراسیون و صحت‌سنجی مدل توسعه یافته

از آن‌جا که مدل‌های عامل‌بنیان شامل پارامترهای زیاد و تعدادی عناصر تصادفی هستند، مدل توسعه یافته با اتخاذ دو رویکرد به کارگیری نظرات افراد متخصص و مقایسه خروجی‌های مدل با مقادیر مشاهداتی در دنیای واقعی، صحت‌سنجی می‌شود [۷۵]. در این پژوهش، با توجه به عدم استفاده از پرسش‌نامه و کاربرد روش کالیبره‌محور تنها روش دوم یعنی رویکرد خروجی‌محور استفاده گردید. بنابراین، در راستای کالیبراسیون مدل توسعه یافته می‌بایست به فرآیند واسنجی و صحت‌سنجی هر یک از زیرمدل‌های توسعه یافته پرداخت.

<sup>۱</sup> User Interface

### ۳-۷-۱- واسنجی و صحت سنجی مدل آب زیرزمینی

کالیبراسیون مدل شبیه‌ساز هیدرولوژیکی به شکل مجزا در دو حالت ماندگار و ناماندگار در طی فرآیند مدل‌سازی صورت می‌گیرد. بررسی صحت مقادیر پارامترهای ورودی و خروجی مدل در دو بخش واسنجی در ابتدای فرآیند شبیه‌سازی و صحت‌سنجی با تعداد مشخصی از گام‌های زمانی ماهانه برای نتایج تولیدشده توسط مدل انجام می‌شود. بررسی اعتبار مدل در این مطالعه با محاسبه دو معیار خطا شامل ریشه میانگین مربعات خطا<sup>۱</sup> (RMSE) و میانگین خطای مطلق<sup>۲</sup> (MAE) مطابق با رابطه‌های (۳-۲۵) و (۳-۲۶) صورت گرفته است که در این روابط  $H_{sim,m}$  و  $H_{obs,m}$  تراز آب مشاهداتی و محاسباتی در گام زمانی  $m$  و  $M$  تعداد کل گام زمانی است:

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^M |H_{sim,m} - H_{obs,m}|}{M} \quad (۳-۲۵)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M (H_{sim,m} - H_{obs,m})^2}{M}} \quad (۳-۲۶)$$

پس از شروع فرآیند مدل‌سازی به دلیل ناکافی بودن داده‌های موجود نظیر سنگ کف، تراز آب در جبهه‌های ورودی و خروجی، ضرایب هدایت هیدرولیکی و نفوذ سطحی به آبخوان نیاز است تا با تغییر پارامترها، بیلان آب زیرزمینی کالیبره گردد. در گام بعد، لازم است در مدل ماندگار مقادیر دو پارامتر هدایت هیدرولیکی آبخوان و مقدار نفوذ سطحی با هدف کاهش تفاوت تراز آب زیرزمینی مشاهداتی و محاسباتی در چاه‌های مشاهداتی کالیبره شود.

کالیبراسیون مدل هیدرولوژیکی به‌طور کلی به دو روش دستی و خودکار امکان‌پذیر است. ابتدا به‌منظور بهبود شرایط اولیه مدل، کالیبراسیون دستی با تغییر مقادیر ضریب هدایت هیدرولیکی و نفوذ سطحی در آبخوان صورت گرفت. سپس، کاهش میزان خطای کالیبراسیون خودکار (PEST) با هدف بهبود خطای مدل اجرا شد. با انجام کالیبراسیون در حالت ماندگار، شبیه‌سازی مدل در حالت ناماندگار بر مبنای مقادیر کالیبره‌شده ضریب هدایت هیدرولیکی و نفوذ سطحی انجام پذیرفت. مدل اولیه حالت ناماندگار بر اساس مقادیر اولیه‌ای از مقدار ضریب آبدهی ویژه مطابق با گزارش‌های بیلان و آزمایش‌های پمپاژ توسعه یافته و مقادیر نفوذ سطحی و جریان‌های ورودی و خروجی برای حالت ناماندگار به صورت ماهانه برای گام‌های زمانی موردنظر در فرآیند واسنجی به مدل معرفی می‌گردد. کالیبراسیون مقادیر اولیه آبدهی ویژه در این مرحله نیز ابتدا به صورت دستی و سپس با بهره‌گیری از فرآیند کالیبراسیون خودکار صورت گرفته است. در نهایت، به جهت انجام فرآیند صحت‌سنجی از مقادیر کالیبره‌شده، مدل توسعه یافته برای یک دوره مشخص اجرا می‌شود. مقدار نهائی شاخص ریشه میانگین مربعات خطا بر اساس تفاوت تراز آب چاه‌های مشاهداتی و محاسباتی برای دو دوره واسنجی و صحت‌سنجی محاسبه می‌شود.

<sup>1</sup> Root Mean Square Error of Aproximation (RMSE)

<sup>2</sup> Mean Absolute Error (MAE)



### ۳-۷-۲- کالیبراسیون مدل هیدرولوژیکی-اجتماعی

پس از فراهم شدن امکان اتصال دو مدل هیدرولوژیکی و اجتماعی و انتقال اطلاعات و خروجی‌های دو نرم افزار به یکدیگر، می‌توان به منظور کالیبراسیون مدل پیوسته اجتماعی-هیدرولوژیکی، از رویکردهای مرسوم بهینه‌سازی استفاده کرد. الگوریتم ژنتیک<sup>۱</sup> یک الگوریتم فراابتکاری است که بر مبنای اصول ژنتیک و انتخاب طبیعی توسعه یافته است. فلوچارت فرآیند بهینه‌سازی در چارچوب الگوریتم ژنتیک در شکل ۳-۵ نمایش داده شده است. این الگوریتم ماهیت فرآیند تکامل را بر اساس موارد زیر تعریف می‌کند [۱۱۴]:

الف) تولید اولیه جمعیت که به‌طور تصادفی ایجاد شده‌اند و مشخصه‌های تعریف شده در قیدها و محدودیت‌های اعمال شده را در نظر می‌گیرد.

ب) عملکرد هر فرد در جمعیت ایجاد شده بر اساس یک تابع تناسب<sup>۲</sup> سنجیده می‌شود.

پ) احتمال بقای هر فرد در مراحل تکامل متناسب با عملکرد آن پارامتر است.

ت) افراد نسل بعدی بر اساس احتمال بقا و از طریق دو فرآیند تزویج<sup>۳</sup> و جهش<sup>۴</sup> تولید می‌شوند.

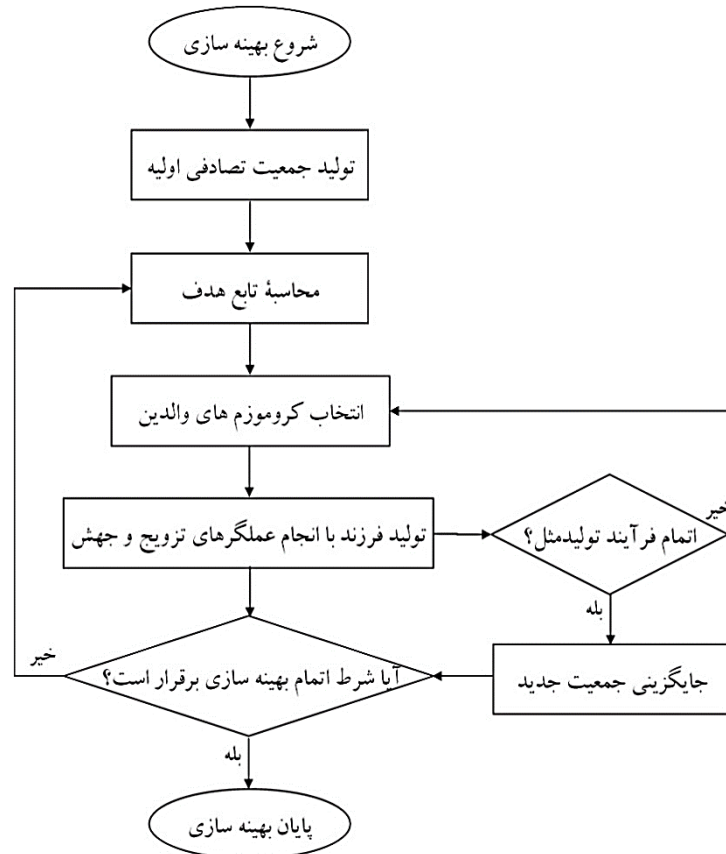
در این مطالعه، در راستای کالیبراسیون مدل توسعه یافته از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. از رویکردهای نوآورانه تحقیق حاضر می‌توان به محاسبه ضرایب اجتماعی یعنی مقادیر  $W_1$ ،  $W_2$  و  $W_3$  در فرآیند کالیبراسیون مدل اشاره کرد. ضرایب اجتماعی یاد شده به‌عنوان متغیرهای تصمیم در مدل پیشنهادی تعریف می‌شوند. در واقع مقدار  $W_3$  به‌عنوان متغیر تصمیم اضافه در نظر گرفته نمی‌شود؛ چرا که از کسر مجموع دو ضریب دیگر از مقدار ۱ محاسبه می‌شود. از آنجا که با تغییر مقادیر تخلیه چاه‌های بهره‌برداری میزان آب برگشتی نیز تغییر می‌کند، ضریب آب برگشتی به‌عنوان دیگر متغیر تصمیم در نظر گرفته می‌شود. هدف از اجرای مدل بهینه‌ساز در این مطالعه کاهش اختلاف بین تراز آب مشاهداتی و تراز آب شبیه‌سازی شده است.

<sup>1</sup> Genetic Algorithm (GA)

<sup>2</sup> Fitness function

<sup>3</sup> Crossover

<sup>4</sup> Mutation



شکل ۳-۵. فلوچارت روند بهینه سازی در الگوریتم ژنتیک [۱۱۴]

در مدل توسعه یافته، تراز آب زیرزمینی خروجی در نرم افزار **MODFLOW** به صورت **ماهانه** و **گام زمانی** تصمیم گیری در مدل **Netlogo** به صورت **سالانه** است. بنابراین، در الگوریتم پیشنهادی با تولید مقادیر تصادفی برای متغیرهای تصمیم، ابتدا مدل **Netlogo** برای یک سال اجرا می شود و مقادیر تخلیه از چاه ها بر اساس نیاز خالص آبی محصولات به شکل گام زمانی ماهانه تولید می شوند. سپس، با وارد شدن **مقادیر تخلیه** به مدل **MODFLOW** مقادیر **تراز آب زیرزمینی ماهانه** به منظور محاسبه مقدار تابع هدف محاسبه می شوند. تابع هدف تعریف شده در این مطالعه، **کمینه سازی میانگین معیار خطای RMSE** برای **۲۵ چاه مشاهداتی** در محدوده مطالعاتی در طول دوره **۹ ساله شبیه سازی** است که در رابطه (۲۷-۳) آورده شده است.

$$Min Z = \frac{\sum_{n=1}^N \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M (H_{obs,i,n} - H_{sim,i,n})^2}{M}}}{N} \quad (27-3)$$

در این رابطه،  $Z$  تابع هدف مدل بهینه سازی،  $H_{obs,i,n}$  تراز آب زیرزمینی مشاهداتی در گام زمانی  $i$  و چاه مشاهداتی  $n$ ،  $H_{sim,i,n}$  تراز آب زیرزمینی شبیه سازی شده در گام زمانی  $i$  و چاه مشاهداتی  $n$ ،  $M$  تعداد کل گام های زمانی

برابر با ۱۰۸ گام و  $n$  تعداد کل چاه‌های مشاهداتی برابر ۲۵ چاه می‌باشد. **قیدهای اعمال شده** در الگوریتم بهینه‌سازی بر اساس رابطه‌های (۲۸-۳) تا (۳۲-۳) تعریف می‌شوند:

$$0 < w_1 < 1 \quad (28-3)$$

$$0 < w_2 < 1 \quad (29-3)$$

$$0 < w_3 < 1 \quad (30-3)$$

$$0 < R < 1 \quad (31-3)$$

$$w_1 + w_2 + w_3 = 1 \rightarrow w_3 = 1 - w_2 - w_1 \quad (32-3)$$

مطابق با روابط ذکرشده،  $w_1$  ضریب نگرش کشاورز،  $w_2$  ضریب هنجارذهنی،  $w_3$  ضریب کنترل رفتاری درک شده و  $R$  ضریب آب برگشتی در مدل پیشنهادی می‌باشد. ارتباط هر پارامتر اجتماعی در تئوری رفتار برنامه‌ریزی شده با مقدار عددی تمایل به اجرای رفتار، بر اساس یک سری ضرایب مسیر مشخص می‌شود که طبق رابطه‌های (۲۸-۳)، (۲۹-۳) و (۳۰-۳) در محدوده صفر تا یک قرار می‌گیرند. این ضرایب در تئوری رفتار برنامه‌ریزی شده مشخص می‌کنند که کدام شاخص اجتماعی در تخمین میزان تمایل کشاورزان از اهمیت بالاتری برخوردار است. بر اساس قید موجود در رابطه (۳۱-۳)، مقدار ضریب آب برگشتی نیز عددی بین صفر و یک است که از **تخلیه محاسبه شده برای چاه‌های بهره‌برداری کسر** می‌شود. در نهایت، با توجه به رابطه (۳۲-۳)، از آن‌جا که تمایل در تئوری رفتاری در ارتباط و پیوستگی کامل و مستقیم با سنج‌های اجتماعی سازنده آن شامل نگرش، هنجار ذهنی و کنترل رفتاری درک شده می‌باشد؛ بنابراین مجموع سه ضریب اجتماعی برابر با یک خواهد بود.

### ۳-۸- جمع‌بندی

در فصل حاضر، چارچوب هیدرولوژیکی-اجتماعی توسعه یافته برای شبیه‌سازی فرآیند تصمیم‌گیری کشاورزان در انتخاب الگوی کشت و کاهش مصرف آب کشاورزی به تفصیل توضیح داده شده است. در دستیابی به این مهم از توسعه یک مدل عامل‌بنیان در پیوستگی کامل با یک مدل توزیعی آب زیرزمینی بهره برده شده است. در این مطالعه، عوامل تأثیرگذار در مدل عامل‌بنیان کشاورزان هستند که بر اساس میزان آب در دسترس و مشخصه رفتاری خود با در نظر گرفتن ملاک تصمیم‌گیری خاصی به انتخاب محصول برای کشاورزی در سال آینده می‌پردازند. در ادامه، بخش نظارتی عامل تأثیرگذار دیگر است که با وجود اینکه در فرآیند شبیه‌سازی رفتاری در نظر گرفته نمی‌شود، با مشخص کردن میزان محدودیت در برداشت کشاورزان بر اساس عملکرد آن‌ها در طول دوره تاریخی، در هر گام تصمیم‌گیری با عوامل کشاورز تعامل می‌کند و بر تصمیمات آن‌ها اثرگذار است.

این مطالعه در یک دیدگاه نوآورانه با توسعه شبیه‌ساز آب زیرزمینی در نرم‌افزار GMS به‌عنوان رابط کاربری برای کد MODFLOW، تأثیرات ناهمگونی مکانی شرایط هیدرولوژیکی و تراز آب زیرزمینی را در تصمیمات کشاورزان

بررسی می‌کند. علاوه بر تراز آب زیرزمینی، عوامل روان‌شناختی و اجتماعی دیگری نیز بر اتخاذ تصمیم توسط عوامل تأثیرگذار هستند. چارچوب به کاررفته در این پژوهش برای شبیه‌سازی رفتار عوامل و فرآیندهای تصمیم‌گیری با الهام از تئوری رفتار برنامه‌ریزی شده توسعه یافته است. به‌طور دقیق‌تر، عوامل مؤثر بر مؤلفه‌های سازنده تمایل کشاورزان به صرفه‌جویی با ارجاع به اسناد اجتماعی و مطالعات موجود شناسائی شدند و معادله ساختاری به‌جهت کمی‌سازی مقدار تمایل کشاورزان ایجاد شده است. بدین ترتیب، میزان تمایل کشاورزان به صرفه‌جویی، گروه رفتاری آن را شامل کشاورزان فعال، تعاملی، نیمه ادراکی و ادراکی مشخص می‌کند.

در راستای برآورده کردن نوآوری دیگر مطالعه یعنی ایجاد اتصال دوطرفه بین دو مدل اجتماعی و هیدرولوژیکی و به‌تبع محاسبه ضرایب رفتاری، دو مدل با استفاده از دو کتابخانه Flopy و Pynetlogo در زبان برنامه‌نویسی پایتون به یکدیگر متصل می‌شوند. در نهایت، در راستای کالیبراسیون و صحت‌سنجی چارچوب توسعه یافته و محاسبه ضرایب اجتماعی در تئوری رفتار برنامه‌ریزی شده از بهینه‌سازی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. می‌توان ادعا کرد که توسعه مدل کاملاً توزیعی، امکان بررسی تعاملات دوسویه بین کشاورز و منبع آب در دسترس او را به‌خوبی فراهم می‌کند. ضمن اینکه، با در نظر گرفتن تمایلات و ویژگی‌های هر کشاورز، امکان پذیرش سیاست‌های اتخاذی از سمت عوامل نظارتی را بهبود می‌بخشد.

## فصل چهارم

### شناسائی محدوده مطالعاتی

#### ۴-۱- مقدمه

در این پژوهش، روش پیشنهادی در فصل سوم در محدوده مطالعاتی اصفهان\_برخوار در حوضه آبریز گاوخونی پیاده‌سازی شده است. در این فصل، به بررسی ویژگی‌های محدوده مطالعاتی اعم از مشخصات اقلیمی و جغرافیایی، مشخصات فرهنگی\_اجتماعی و منابع آب مصرفی پرداخته شده است. سپس، با دیدی جزئی‌تر وضعیت کشاورزی محدوده بررسی شده است تا اطلاعات به‌کاررفته در پژوهش شامل نیاز خالص آبیاری، ضریب حساسیت به کم‌آبی، عملکرد محصولات و سایر اطلاعات به‌طور مفصل شرح داده شود. در نهایت با ارائه هدف‌های انتخاب محدوده مطالعاتی، جمع‌بندی مطالب ارائه می‌شود.

#### ۴-۲- معرفی حوضه آبریز گاوخونی

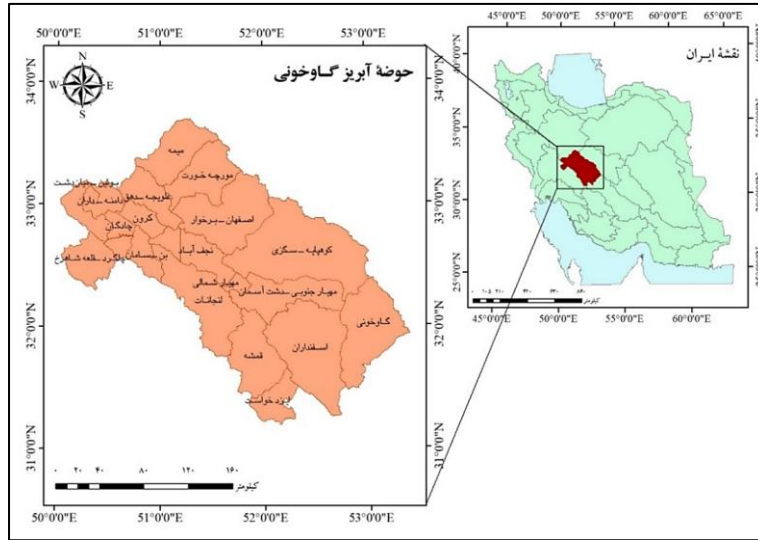
حوضه آبریز گاوخونی در تقسیم‌بندی کلی هیدرولوژیکی ایران، جزو حوضه آبریز درجه یک فلات مرکزی ایران می‌باشد که با کد ۴۲ مشخص شده است. مساحت این حوضه آبریز که یکی از زیرحوضه‌های سی‌گانه درجه دو ایران است، برابر با  $41552/3$  کیلومتر مربع می‌باشد که حدود ۴۰ درصد آن را مناطق کوهستانی و ۵۹ درصد آن را دشت‌ها و کوهپایه و ۱ درصد باقیمانده را تالاب به مساحت ۴۸۵ کیلومتر مربع تشکیل می‌دهند. محدوده جغرافیایی این حوضه از سمت شمال به حوضه آبریز دریاچه نمک، از غرب به حوضه آبریز کارون بزرگ، از شرق به حوضه کویر سیاه کوه\_ریگ زرین و از جنوب به حوضه‌های کویر سیرجان و مهارلو محصور شده است. این حوضه آبریز بین ۱۰ تا ۳۱

۳۳ ۴۰ عرض شمالی و ۵۰ ۳۰ تا ۵۳ ۲۳ طول شرقی واقع شده است. موقعیت حوضه‌های سی‌گانه کشور و محدوده مطالعاتی حوضه آبریز گاوخونی در شکل ۴-۱ ارائه شده است [۱۱۵-۱۱۷].

باتوجه به پائین بودن میزان نزولات جوی در این حوضه آبریز، بالا بودن تراکم جمعیت و نیازهای صنعتی، حجم قابل توجهی از آب‌های زیرزمینی در این محدوده به مصرف می‌رسد و در پی آن از حجم ذخایر آب‌های زیرزمینی کاسته می‌شود؛ به طوری که تعداد زیادی از دشت‌های این حوضه از لحاظ برداشت آب زیرزمینی ممنوعه و ممنوعه بحرانی اعلام شده‌اند. از نظر منابع آب سطحی، ۲۸ درصد از منابع سطحی حوضه گاوخونی از حوضه‌های مجاور تأمین شده و عمده‌ترین رودخانه‌های این حوضه شامل: رودخانه زاینده‌رود، پلاسجان، رودخانه شور دهقان، رودخانه مرغاب، دستکن، زرچشمه و ایزدخواست است [۱۱۸].

حوضه آبریز گاوخونی، خود دربرگیرنده ۲۱ زیرحوضه درجه چهار بوده که از این تعداد ۱۷ محدوده زیر نظر مدیریت شرکت آب منطقه‌ای اصفهان، سه محدوده زیر نظارت شرکت آب منطقه‌ای چهارمحال و بختیاری و یک محدوده زیر پوشش شرکت آب منطقه‌ای فارس می‌باشد. در این میان، محدوده‌های کوهپایه-سگزی، اصفهان-برخوار، مورچه‌خورت، علویجه دهق، میمه، نجف‌آباد، کرون، مهیار شمالی، دامنه داران، مهیار جنوبی، قمشه و اسفنداران که در محدوده استان اصفهان واقع شده‌اند، از سوی وزارت نیرو جزو دشت‌های ممنوعه اعلام شده‌اند و محدوده‌های چادگان، بوئین میان دشت، چهل‌خانه و گاوخونی در بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی آزاد هستند. از میان ۲۱ محدوده مطالعاتی محدوده‌های کوهپایه-سگزی، اصفهان-برخوار، نجف‌آباد و لنجانان که شبکه‌های آبیاری منشعب و رودخانه زاینده‌رود را در بر می‌گیرند، با برداشت ۲۳۰۷ میلیون مترمکعب از آب زیرزمینی، ۶۶ درصد از کل تخلیه حوضه را به خود اختصاص داده‌اند [۱۱۹].

از لحاظ وضعیت اقلیمی، بر اساس خطوط هم‌دما در این حوضه، منحنی دمائی ۱۶ درجه سانتی‌گراد بالاترین منحنی دمائی متعلق به بخش‌های جنوب شرقی حوضه می‌باشد؛ در حالی که پائین‌ترین منحنی دمائی برابر با ۸ درجه سانتی‌گراد از محدوده بوئین میاندشت می‌گذرد. منحنی‌های هم‌باران ترسیم شده کاهش میزان بارندگی از غرب به شرق و از شمال به جنوب حوضه را نشان می‌دهد؛ چراکه رشته کوه‌های بلند زاگرس در غرب حوضه باعث بارش زیاد در منطقه می‌شوند و با کاهش ارتفاع میزان بارش به شدت کاهش می‌یابد. باتوجه به اختلاف ارتفاع بالای بین نقاط مختلف حوضه یعنی ۳۹۷۴ متر در کوه کاریوش و کمترین ارتفاع ۱۴۶۶ در تالاب گاوخونی، بالاترین منحنی بارش ۱۸۰۰ میلی‌متر در محدوده چلگرد قلعه شاهرخ و کمترین منحنی ۱۰۰ میلی‌متر در جنوب شرقی حوضه می‌باشد [۱۱۹].



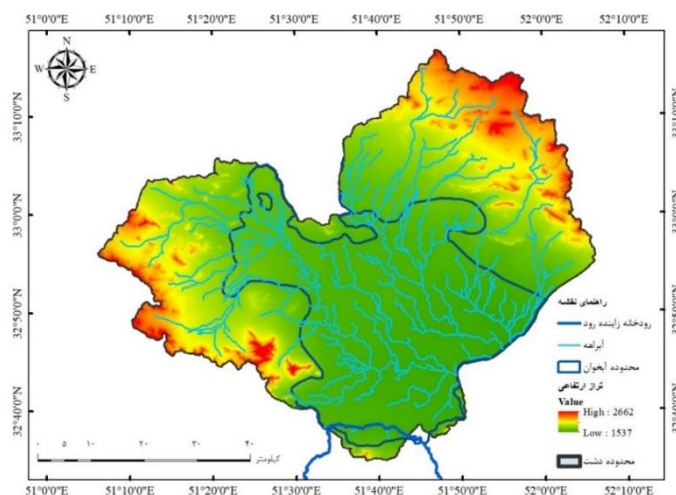
شکل ۴-۱ نقشه ایران و محدوده های مطالعاتی در حوضه آبریز گاوخونی

#### ۴-۳- معرفی آبخوان اصفهان-برخوار

محدوده مطالعاتی اصفهان-برخوار با کد ۴۲۰۲ یکی از محدوده های مطالعاتی حوضه آبریز گاوخونی با وسعت ۳۷۷۵/۶ کیلومتر مربع می باشد که ۲۴۰۸/۴ کیلومتر مربع از این محدوده را دشت و ۱۳۶۷/۲ کیلومتر مربع را ارتفاعات تشکیل می دهند. حدود ارتفاعی محدوده از ۱۵۹۸ متر در بخش جنوبی حوضه در مجاور دشت کوهپایه-سگزی تا حداکثر ارتفاع ۲۶۴۱ متر از سطح دریا، در بخش های شمالی محدوده می باشد. نقشه تراز ارتفاعی این آبخوان در شکل ۴-۲ نمایش داده شده است. از نظر موقعیت جغرافیایی آبخوان اصفهان-برخوار بین مدار ۵۱ درجه و ۰۵ دقیقه و ۴۸ ثانیه و ۵۱ درجه ۵۸ دقیقه و ۱۳ ثانیه طول شرقی و ۳۲ درجه و ۳۳ دقیقه و ۴۰ ثانیه تا ۳۳ درجه و ۱۶ دقیقه و ۳۸ ثانیه عرض شمالی واقع شده است. این محدوده از شمال به محدوده مطالعاتی مورچه خورت (۴۲۰۳)، از شمال شرق به محدوده طرق آبیازن (۴۲۰۸)، از جنوب غرب به محدوده مطالعاتی نجف آباد (۴۲۰۶)، از غرب به محدوده علویجه-دهق (۴۲۰۴) و از شرق و جنوب شرق محصور به محدوده مطالعاتی کوهپایه-سگزی (۴۲۰۱) می باشد [۱۱۵].

باتوجه به وجود شهرهای مهمی چون: اصفهان، خمینی شهر، دولت آباد، رهنان، گز، خورزوق، حبیب آباد و دستگرد، بیشترین تراکم جمعیتی در بین محدوده های حوضه آبریز گاوخونی در دشت اصفهان برخوار وجود دارد. بنابراین، به دلیل نیاز بالای مصرف شرب در این محدوده، بیشترین میزان آب انتقالی در حوضه گاوخونی به محدوده اصفهان-برخوار صورت می گیرد. از دیگر طرح های عمرانی-آبی مهم در محدوده می توان به سد آبشار، کانال انتقال آب برخوار و خطوط انتقال آب اشاره کرد. جریان آب سطحی اصلی در این محدوده رودخانه زاینده رود است که از بخش غربی محدوده عبور می کند. ضمن اینکه، با وجود دو تصفیه خانه 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-سگری می‌شود [۱۲۰، ۱۲۱].



شکل ۴-۲ تراز ارتفاعی و تفکیک محدوده دشت و آبخوان آبرفتی اصفهان-برخوار

#### ۴-۴- مشخصات اقلیمی محدوده مطالعاتی

مطالعات اقلیمی و هواشناسی یک منطقه می‌تواند تأثیر بسزایی در مدیریت آب‌های زیرزمینی داشته باشد. بنابراین، لازم است میزان ریزش‌های جوی، تبخیر و درجه حرارت منطقه مورد بررسی قرار گیرد. جهت دستیابی به داده‌های مورد نیاز در ارزیابی وضعیت اقلیمی، می‌بایست در ابتدا ایستگاه‌های هواشناسی و آمار موجود در منطقه مطالعه گردد. ایستگاه‌های هواشناسی شناسائی شده در محدوده، شامل ۴ ایستگاه کليما تولوژی، ۷ ایستگاه باران‌سنجی سازمان هواشناسی و ۳ ایستگاه باران‌سنجی وزارت نیرو است که با توجه به تعطیلی ۳ ایستگاه مارنان، پالایشگاه اصفهان و دانشگاه صنعتی اصفهان تنها داده‌های ۱۱ ایستگاه در دسترس است که در جدول ۴-۱ قابل مشاهده است.

بدین ترتیب، بر اساس رسم خطوط هم‌دما در منطقه مورد مطالعه، متوسط دمای سالانه در دشت و ارتفاعات به ترتیب برابر با ۱۴ و ۱۶ درجه سانتی‌گراد است. بر اساس نتایج، تیرماه گرم‌ترین و دی‌ماه سردترین ماه در طول سال شناسائی می‌شوند. در بررسی میزان بارش‌های جوی در منطقه اصفهان-برخوار با رسم خطوط هم‌باران مشخص می‌گردد که متوسط میزان بارش در محدوده در ارتفاعات برابر با ۱۴۲ میلی‌متر و در دشت برابر با ۱۱۵ میلی‌متر اندازه‌گیری شده است. به همین ترتیب، کم بارش‌ترین ماه سال شهریور ماه و پر بارش‌ترین ماه سال فروردین ماه می‌باشد. در نهایت برای برآورد میزان تبخیر در محدوده، بر اساس خطوط هم‌تبخیر می‌توان گفت که متوسط تبخیر در محدوده در ارتفاعات و دشت به ترتیب برابر با ۲۳۷۲/۲ و ۲۴۰۲/۶ میلی‌متر تخمین زده می‌شود. همچنین، میزان تبخیر از سطح آزاد آب در



محدوده در ارتفاعات و دشت به ترتیب برابر با ۱۶۸۷/۸ و ۱۶۹۷/۴ میلی متر می باشد. جدول های ۴-۲ تا ۴-۵ به ترتیب میزان دمای ماهانه، میزان بارش ماهانه، میزان تبخیر و تبخیر از سطح آزاد آب را به صورت سالانه نمایش می دهد [۱۲۰].

**جدول ۴-۱** مشخصات ایستگاه های هواشناسی در محدوده اصفهان-برخوار

ردیف	ایستگاه	نوع ایستگاه	مشخصات جغرافیائی				ارتفاع (متر)	سال تاسیس
			عرض		طول			
			درجه	دقیقه	درجه	دقیقه		
۱	اصفهان	بارانسنجی-وزارت نیرو	۳۲	۳۸	۵۱	۴۰	۱۳۴۵	
۲	جعفرآباد	بارانسنجی-وزارت نیرو	۳۲	۴۸	۵۱	۳۶	۱۳۵۲	
۳	پالایشگاه اصفهان	کلیماتولوژی-سازمان هواشناسی	۳۲	۴۶	۵۱	۳۰	۱۳۶۲	
۴	کارخانه قند	کلیماتولوژی-سازمان هواشناسی	۳۲	۳۸	۵۱	۴۷	۱۳۷۸	
۵	پروانه	بارانسنجی-سازمان هواشناسی	۳۲	۵۰	۵۱	۵۵	۱۳۸۱	
۶	جهادآباد	بارانسنجی-سازمان هواشناسی	۳۲	۵۱	۵۱	۲۲	۱۳۸۱	
۷	خمینی شهر	بارانسنجی-سازمان هواشناسی	۳۲	۴۰	۵۱	۳۱	۱۳۴۶	
۸	دنبی برخوار و میمه	بارانسنجی-سازمان هواشناسی	۳۳	۰۳	۵۱	۴۸	۱۳۸۱	
۹	دولت آباد	بارانسنجی-سازمان هواشناسی	۳۲	۴۸	۵۱	۴۱	۱۳۵۱	
۱۰	کمشچه	بارانسنجی-سازمان هواشناسی	۳۲	۵۴	۵۱	۴۸	۱۳۸۱	
۱۱	مرق برخوار	بارانسنجی-سازمان هواشناسی	۳۳	۰۴	۵۱	۵۰	۱۳۸۱	

**جدول ۴-۲** متوسط دما به تفکیک دشت و ارتفاعات در محدوده اصفهان-برخوار (درجه سانتیگراد) [۱۲۰]

ماه	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	سالانه
ارتفاعات	۱۷/۸	۱۰/۳	۳/۴	-۰/۲	۲/۲	۷/۴	۱۱/۳	۱۷/۳	۳۲/۲	۲۷	۲۵/۷	۲۲/۶	۱۴
دشت	۱۷/۳	۹/۶	۴/۳	۱/۸	۵/۳	۹/۶	۱۵/۶	۲۱/۱	۲۶/۸	۲۹/۷	۲۸	۲۳/۸	۱۶/۱

**جدول ۴-۳** توزیع ماهانه بارش به تفکیک دشت و ارتفاعات در محدوده اصفهان-برخوار (میلیمتر) [۱۲۰]

ماه	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	سالانه
ارتفاعات	۳/۶	۱۴/۱	۲۰/۱	۱۸/۳	۱۸/۶	۲۲/۳	۲۱/۹	۱۶/۲	۳/۲	۱/۵	۱/۶	۰/۵	۱۴۲
دشت	۳/۵	۱۰/۳	۲۰/۳	۱۸/۷	۱۴/۱	۲۰/۳	۱۷	۸/۲	۰/۹	۱/۲	۰/۵	۰/۱	۱۱۵

**جدول ۴-۴** توزیع ماهانه تبخیر به تفکیک دشت و ارتفاعات در محدوده اصفهان-برخوار (میلیمتر) [۱۲۰]

ماه	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	سالانه
ارتفاعات	۱۷۴/۳	۷۰	۲۲/۶	۲۰/۵	۳۳/۳	۶۱/۲	۲۰۱/۳	۳۰۲/۴	۳۷۱/۵	۴۱۷/۹	۳۸۰	۲۷۲/۴	۲۳۲۷/۲
دشت	۱۸۰	۷۲/۳	۲۳/۳	۲۱/۱	۳۴/۴	۶۳/۱	۲۰۷/۸	۳۱۲/۲	۳۸۳/۵	۴۳۱/۴	۳۹۲/۳	۲۸۱/۲	۲۴۰۲/۶

**جدول ۴-۵** توزیع ماهانه تبخیر از سطح آزاد به تفکیک دشت و ارتفاعات در محدوده اصفهان-برخوار (میلیمتر) [۱۲۰]

ماه	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	سالانه
ارتفاعات	۱۳۹/۵	۵۹/۵	۲۰/۳	۱۹/۵	۳۰	۵۲	۱۷۱/۱	۲۲۶/۸	۲۶۰	۲۷۱/۶	۲۴۷	۱۹۰/۷	۱۶۸۷/۸
دشت	۱۴۴	۶۱/۴	۲۱	۲۰/۱	۳۰/۹	۵۳/۷	۱۶۶/۳	۲۱۸/۵	۲۴۹/۳	۲۸۰/۴	۲۵۵	۱۹۶/۸	۱۶۹۷/۴

**۴-۵- وضعیت منابع و مصارف آب**

از محوری ترین مسائل در مدیریت منابع آب یک محدوده مطالعاتی، بررسی ذخایر آب و امکانات موجود در راستای بهبود بهره برداری، مدیریت منابع و تخصیص به مصارف مختلفی چون: کشاورزی، شرب، صنعت و غیره است؛ بنابراین، در این بخش به بررسی منابع آب سطحی و زیرزمینی در محدوده مطالعاتی اصفهان-برخوار پرداخته شده است.

**۴-۵-۱- منابع آب سطحی**

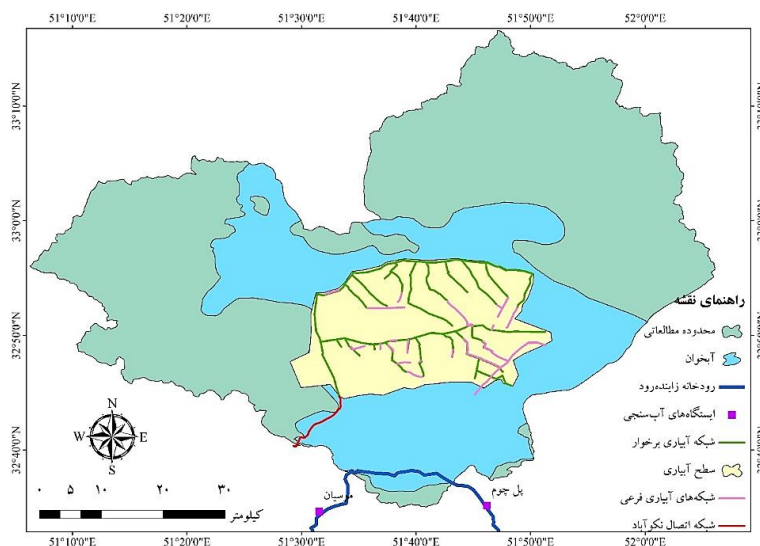
اصلی ترین جریان سطحی ورودی به محدوده اصفهان-برخوار، رودخانه زاینده رود است که از سمت دشت نجف آباد وارد محدوده شده و سپس با ورود به دشت کوهپایه-سگری از محدوده خارج می شود. به علاوه، برخی سالها نیز یک جریان سیلابی از سمت آبخوان مورچه خورت وارد محدوده مطالعاتی می شود. از دیگر جریان های عمده منابع آب سطحی در این محدود می توان کانال آبیاری برخوار و پساب دو تصفیه خانه شمال و شاهین شهر را نام برد که غالباً برای مصرف کشاورزی به منطقه اختصاص داده شده اند [۱۲۰]. جهت محاسبه میزان جریان های سطحی ورودی و خروجی به حوضه آبریز اصفهان-برخوار از اطلاعات ایستگاه های هیدرومتری موجود استفاده شده است. با توجه به اینکه دو ایستگاه هیدرومتری واقع در محدوده یعنی ایستگاه مارنان و پل خواجه تعطیل هستند؛ برای برآورد جریان سطحی ورودی از ایستگاه هیدرومتری موسیان واقع در مرز خروجی محدوده نجف آباد و به جهت برآورد جریان سطحی خروجی از ایستگاه پل چوم واقع در مرز بین دو حوضه اصفهان-برخوار و کوهپایه-سگری بهره گرفته می شود. اطلاعات ایستگاه های هیدرومتری در جدول ۴-۶ نشان داده شده است. بدین ترتیب بر اساس اطلاعات ایستگاه موسیان، میزان جریان سطحی ورودی به حوضه برابر با ۳۸۰/۵ میلیون مترمکعب تخمین زده می شود که نظر به وجود جریان سطحی خروجی از محدوده مورچه خورت به حوضه اصفهان-برخوار به میزان ۱۴/۵ میلیون مترمکعب، مجموع جریان سطحی ورودی برابر با ۳۹۵ میلیون مترمکعب، میزان جریان سطحی خروجی نیز بر اساس اطلاعات موجود برابر با ۱۵۹/۲ میلیون مترمکعب تخمین زده می شود. نتایج، بر اساس میانگین ۱۵ ساله منتهی به سال های ۱۳۸۹ تا ۱۳۹۰ از میزان آبدهی دو ایستگاه مورد بررسی تخمین زده شده است.

از سال ۱۳۷۵، سازمان آب منطقه ای استان اصفهان با هدف بهبود تأمین آب کشاورزی و حفظ منابع آب زیرزمینی موجود، اقدام به بهره برداری از شبکه آبیاری دشت برخوار نمود که توسط رودخانه زاینده رود تغذیه می شود. شبکه آبیاری برخوار، آب را به دو بخش شبکه شمالی موسوم به شبکه بل به طول ۳۲ کیلومتر و شبکه جنوبی موسوم به

حاجی آباد به طول ۲۵ کیلومتر منتقل می نماید که ظرفیت هر کدام به ترتیب ۱۰/۲۵ و ۷/۷۵ مترمکعب بر ثانیه است. منابع آب سطحی یادشده شامل رودخانه زاینده رود و شبکه آبیاری در شکل ۴-۳ نشان داده شده است [۱۲۲].

جدول ۴-۶ مشخصات ایستگاههای هیدرومتری محدوده اصفهان-برخوار

کد ایستگاه	رودخانه	ایستگاه	مشخصات جغرافیایی			تاریخ تاسیس	وضعیت
			طول	عرض	ارتفاع		
۴۲-۰۱۹	زاینده رود	مارنان	۵۶۰۳۱۵	۳۶۱۱۶۲۳	۱۵۷۳	۱۳۲۷	تعطیل
۴۲-۰۵۹	زاینده رود	پل خواجو	۵۶۴۷۷۲	۳۶۱۱۴۳۵	۱۵۶۶	۱۳۲۷	تعطیل
۴۲-۴۵۹	زاینده رود	موسیان	۵۷۲۲۹۲	۳۶۰۵۵۴۳	۱۶۰۰	۱۳۷۴	فعال
۴۲-۰۵۹	زاینده رود	پل چوم	۵۴۹۳۸۱	۳۶۰۴۵۱۰	۱۵۵۱	۱۳۶۴	فعال



شکل ۴-۳ موقعیت رودخانه و شبکه های مدرن آبیاری در دشت اصفهان-برخوار [۷۶]

باتوجه به اطلاعات موجود از میزان آب اختصاص داده شده به شبکه آبیاری، در جدول ۴-۷ برخوار می توان نتیجه گرفت که میزان آب ورودی به شبکه تا حد زیادی به برنامه بهره برداری از سد و میزان حجم ذخیره سد بستگی دارد. به طوری که در طی سال های کم آبی میزان آب اختصاص یافته به شبکه ناچیز بوده، در حالی که در طی سال های پر آبی حجم ورودی به شبکه تا حد زیادی افزایش داشته است.

جدول ۴-۷ حجم ماهانه آب تخصیص یافته به شبکه آبیاری برخوار (میلیون مترمکعب) [۱۲۲]

مجموع	ماه											سال آبی	
	شهریور	مرداد	تیر	خرداد	اردیبهشت	فروردین	اسفند	بهمن	دی	آذر	آبان		مهر
۳/۵۹۴	۰/۰۸۶	۰/۱۳	۰/۲۶	۰/۱۳	۰/۰۳۸	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲/۹۵	۱۳۸۹-۹۰
۰/۱۰۱	۰	۰	۰/۰۸۶	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۳۹۰-۹۱
۰/۸۰۵	۰/۰۲۶	۰/۱۰۳	۰/۱۵۵	۰/۲۱	۰/۳۱۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۳۹۱-۹۲
۰/۶۳۵	۰/۱۲	۰/۱۲۹	۰/۱۷	۰/۲۱۶	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۳۹۲-۹۳
۱۰/۵۷۵	۰	۰	۰	۰/۰۹۵	۶/۸۶	۰	۰	۰	۳/۶۲	۰	۰	۰	۱۳۹۳-۹۴
۱۲/۰۶	۰	۰	۰	۱/۷۹	۲/۹۵	۰	۳/۲۴	۰	۱/۷۱	۲/۳۷	۰	۰	۱۳۹۴-۹۵
۴/۷۴	۰	۰	۰	۱/۷۹	۲/۹۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۳۹۵-۹۶
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۳۹۶-۹۷
۲۱/۹۹	۵/۱۷	۵/۱۷	۴/۴۷	۱/۱۸	۳/۰۱	۲/۷۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۳۹۷-۹۸

در نهایت، پساب تصفیه‌خانه‌های شمال اصفهان و شاهین‌شهر از دیگر منابع آب سطحی در محدوده اصفهان\_برخوار به‌شمار می‌آیند که به آن‌ها پرداخته می‌شود. بر اساس گزارشات آب منطقه‌ای اصفهان، در مجموع ۶۵۰ لیتر بر ثانیه از دبی خروجی تصفیه‌خانه شاهین‌شهر به بخش‌های مختلف در محدوده دشت اصفهان\_برخوار واگذار شده است که بیشتر برای مصارف صنعتی و آبیاری فضای سبز به کار می‌رود؛ این مقادیر در جدول ۴-۸ قابل مشاهده است. بر اساس آمار و اطلاعات اخذ شده در جدول ۴-۹، از میزان کلی دبی تصفیه‌خانه شمال به میزان ۲۰۸۱ لیتر بر ثانیه، میزان ۹۷۶ لیتر بر ثانیه در حال بهره‌برداری است که مصرف کنندگان عمده آن‌ها شامل موارد زیر می‌باشند [۱۲۴]:

- ۱) کشاورزانی که به‌ازای فروش اراضی خود جهت احداث تصفیه‌خانه، حق استفاده از پساب را دارند؛
- ۲) مصرف کنندگانی که بر اساس قراردادهای منعقد شده با آب منطقه‌ای از پساب موجود بهره‌برداری می‌کنند و
- ۳) مصرف کنندگانی که بر اساس قراردادهای منعقد شده با شرکت آب و فاضلاب از پساب موجود بهره‌برداری می‌کنند.

از طرفی، بر اساس بازدیدهای به‌عمل آمده و بررسی کانال خروجی تصفیه‌خانه که به منطقه حبیب‌آباد تخلیه می‌شود، مشخص شده است که تعداد زیادی از کشاورزان جهت آبیاری اراضی کشاورزی خود به‌ویژه اراضی با کشت جو و ذرت در محدوده نسبت به برداشت از پساب اقدام می‌نمایند.

جدول ۴-۸ اطلاعات مربوط به مصرف کنندگان فعلی تصفیه‌خانه شاهین شهر [۱۲۳]

ردیف	متصدی واگذاری	مشخصات صاحب قرارداد			نوع کاربری	توضیحات
		نام متقاضی	تاریخ قرارداد	لیتر در ثانیه		
۱		شهرداری شاهین شهر	۸۹/۰۵/۱۳	۱۵۰	فضای سبز	در حال برداشت
۲		شهرداری اصفهان	۸۹/۰۵/۲۶	۱۰۰	فضای سبز	در حال برداشت
۳	شرکت آب منطقه‌ای اصفهان	دانشگاه صنعتی مال اشتر	۹۲/۰۶/۰۴	۱۰	فضای سبز	در حال برداشت
۴		شرکت پالایش نفت	۹۲/۱۱/۲۰	۲۱۰	صنعتی	در حال برداشت
۵		شرکت مدیریت تولید برق شهید محمد منتظری	۹۲/۱۲/۱۸	۱۸۰	صنعتی	در حال برداشت

جدول ۴-۹ اطلاعات مربوط به مصرف کنندگان فعلی تصفیه‌خانه شمال [۱۲۴]

ردیف	متصدی واگذاری	مشخصات متقاضی			نوع کاربری	توضیحات
		نام و نام خانوادگی	تاریخ قرارداد	لیتر در ثانیه		
۱	شرکت آب منطقه‌ای	اداره منابع طبیعی و آبخیزداری اصفهان	۸۸/۰۳/۲۱	۲۰۰	۲۶۳	در حال برداشت
		شرکت گیاه‌گونه دشت اصفهان	۸۹/۰۱/۲۶	۱۸		در حال برداشت
		شرکت سرمد شبنم سپاهان	۸۹/۰۱/۲۶	۲۰		در حال برداشت
		شهرداری حبیب‌آباد	۹۲/۰۲/۱۵	۲۵		در حال برداشت
۲	شرکت آب و فاضلاب	قراردادهای سالیانه نامشخص		۲۰۳	۵۱۰	در حال برداشت
		کشاورزان (۲۸ نفر)	۶۱/۰۲/۱۶	۵۱۰		در حال برداشت

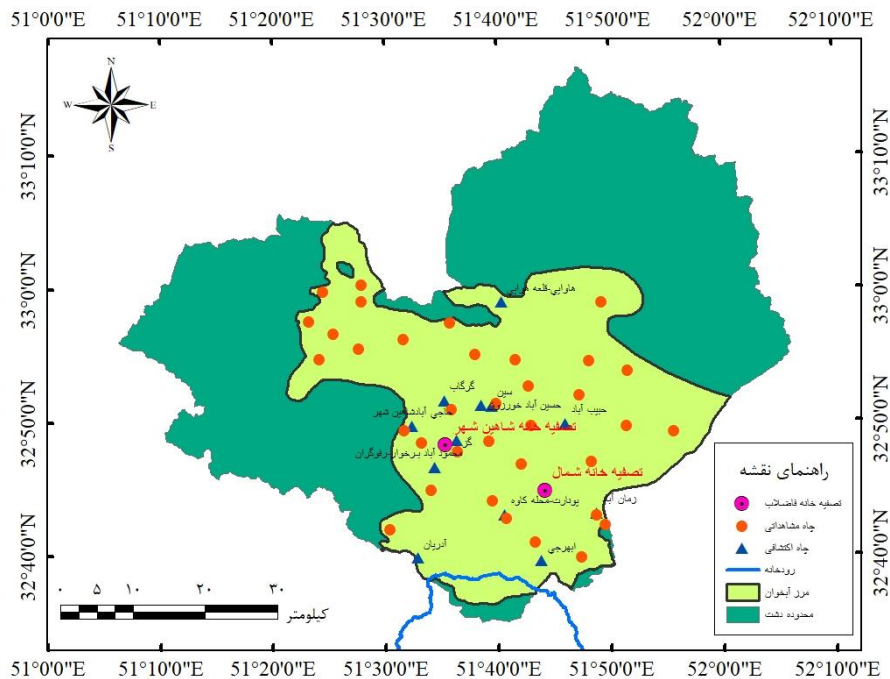
## ۴-۵-۲- منابع آب زیرزمینی

دشت اصفهان-برخوار با مساحت ۲۴۰۸/۴ کیلومتر مربع شامل ۱۳۶۷/۲ کیلومتر مربع ارتفاعات و ۱۶۴۲/۸ کیلومتر مربع از آبخوان آبرفتی است. 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 که در شکل ۴-۴ موقعیت این چاه‌ها قابل مشاهده است [۱۲۵].

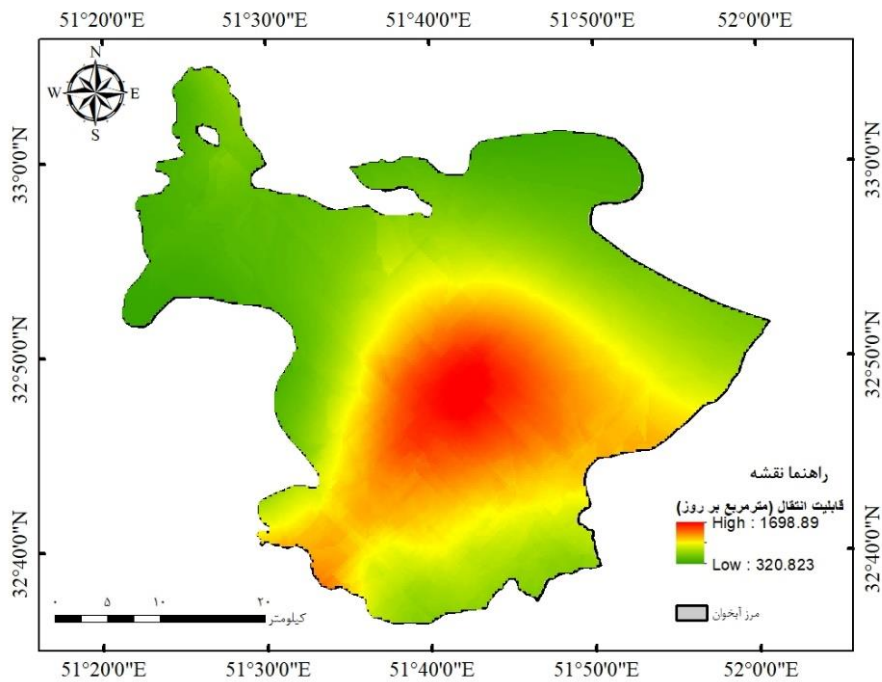
بر اساس نتایج آزمایش‌های پمپاژ انجام شده در محدوده می‌توان نتیجه گرفت که ضریب قابلیت انتقال در محدوده آبخوان از طیف گسترده‌ای برخوردار است. به عنوان مثال، در این محدوده، بخشی از آبخوان که در شمال واقع شده،

اکثراً رسوبات دانه درشت و مخروط افکنه‌ای نهشته شده که ضریب قابلیت بالائی را نشان می‌دهد؛ در صورتی که در سمت جنوب و به سمت رودخانه، رسوبات دانه ریزتر بوده و از ضریب انتقال پائین تری برخوردار هستند. محدوده تغییرات قابلیت انتقال (T) در شکل ۴-۵ آورده شده است [۱۲۵].

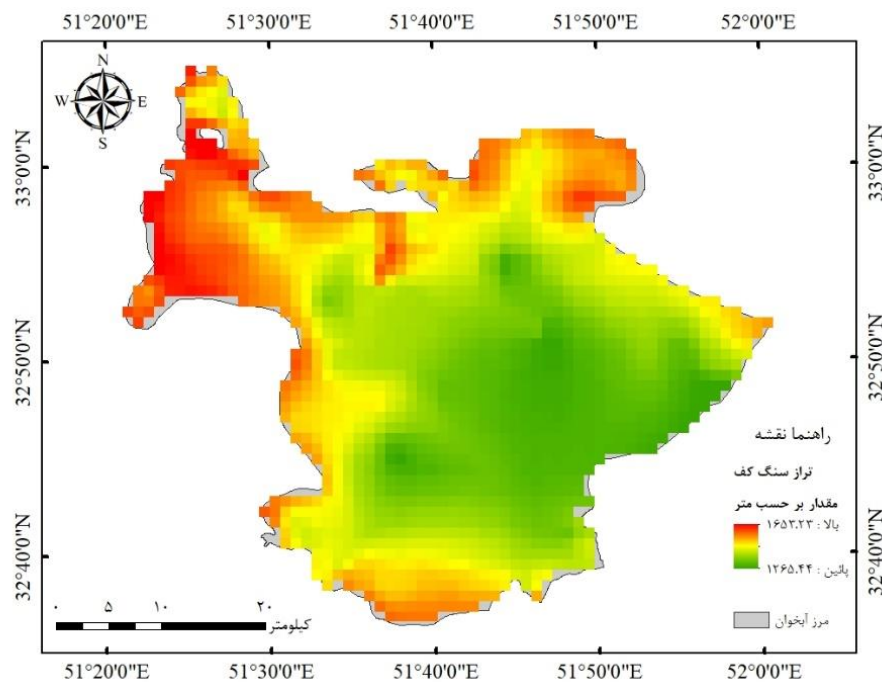
از دیگر اطلاعات مورد نیاز در مدل‌سازی آب زیرزمینی محدوده اصفهان-برخوار، اطلاعات سنگ کف محدوده است که با توجه به عدم دقت اطلاعات موجود و ناکافی بودن داده‌ها، از اطلاعات چاه‌های بهره‌برداری که به سنگ کف برخورد کرده‌اند و درون‌یابی و اصلاح داده‌های موجود به جهت تخمین اولیه سنگ کف استفاده شده است که در مراحل مدل‌سازی بهبود داده می‌شوند. به‌طور کلی بر اساس بررسی لوگ حفاری چاه‌های اکتشافی و چاه‌های عمیق در محدوده می‌توان گفت که ضخامت آبخوان در نقاط مختلف کاملاً متغیر بوده و از چند متر در دامنه ارتفاعات (بخش‌های شمالی و شمال غربی و جنوبی) شروع و تا حدود ۳۰۰ متر در برخی نقاط (محدوده مرکزی دشت) تغییر می‌نماید. تراز سنگ کف محدوده آبخوان در شکل ۴-۶ به تصویر کشیده شده است [۱۲۵].



شکل ۴-۶- موقعیت تصفیه‌خانه‌ها، چاه‌های مشاهداتی و چاه‌های اکتشافی در محدوده آبخوان



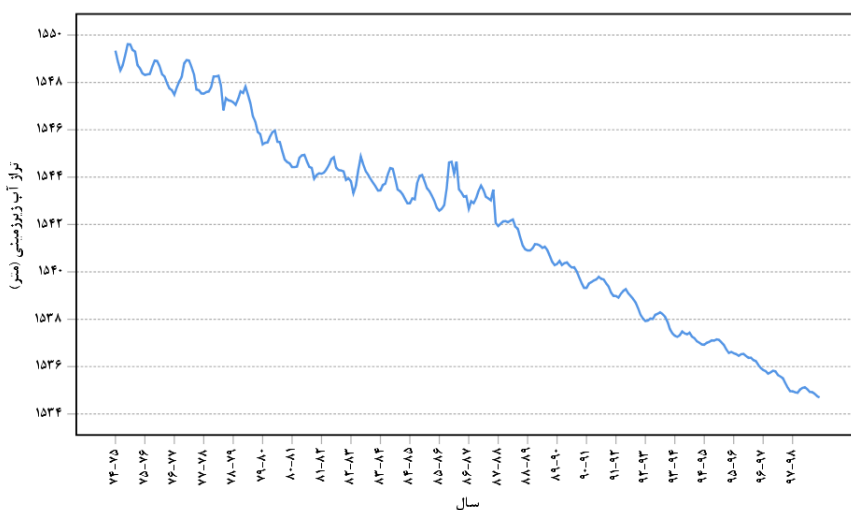
شکل ۴-۵ تغییرات قابلیت انتقال در محدوده آبخوان اصفهان-برخوار



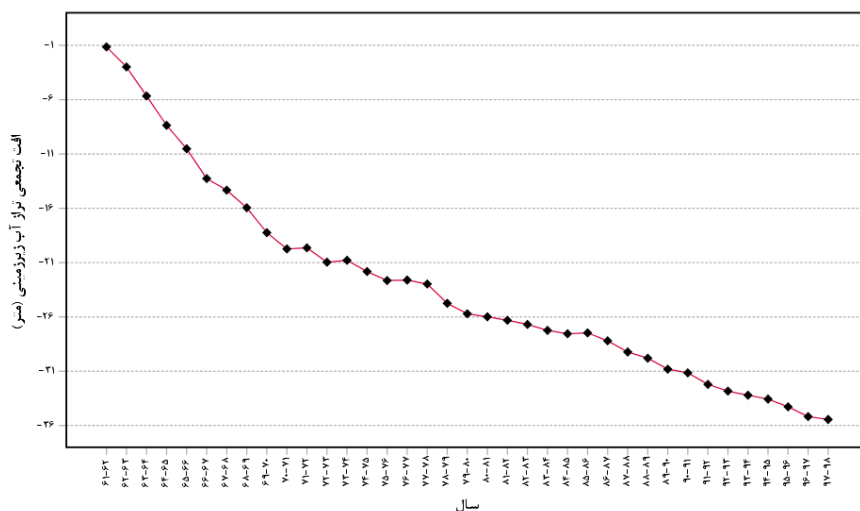
شکل ۴-۶ تراز سنگ کف در محدوده آبخوان آبرفتی اصفهان-برخوار

به منظور بررسی سطح ایستابی و عمق سطح آب در آبخوان اصفهان-برخوار و ترسیم خطوط جریان، جهت جبهه های ورودی و خروجی آب زیرزمینی و در نهایت تهیه هیدروگراف درازمدت آبخوان از آمار ماهانه سطح آب در ۳۵ حلقه چاه مشاهداتی مذکور استفاده شده است. بر اساس هیدروگراف معرف آبخوان اصفهان-برخوار با وجود

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 بالا آمدگی آب در فصول تر نیز کاهش یافته است. به‌طور کلی، متوسط سالانه افت از مهر ۱۳۷۵ تا شهریور ۱۳۹۸ برابر ۰/۵۹ بوده است که در ۱۱ سال آخر منتهی به شهریور ۱۳۹۸، این میزان به ۰/۶۶ متر رسیده است. شکل ۴-۷ هیدروگراف معرف آبخوان آبرفتی اصفهان\_برخوار و شکل ۴-۸ افت تجمعی از سال ۱۳۶۱-۱۳۶۲ تا سال ۱۳۹۷-۱۳۹۸ را نشان می‌دهد.



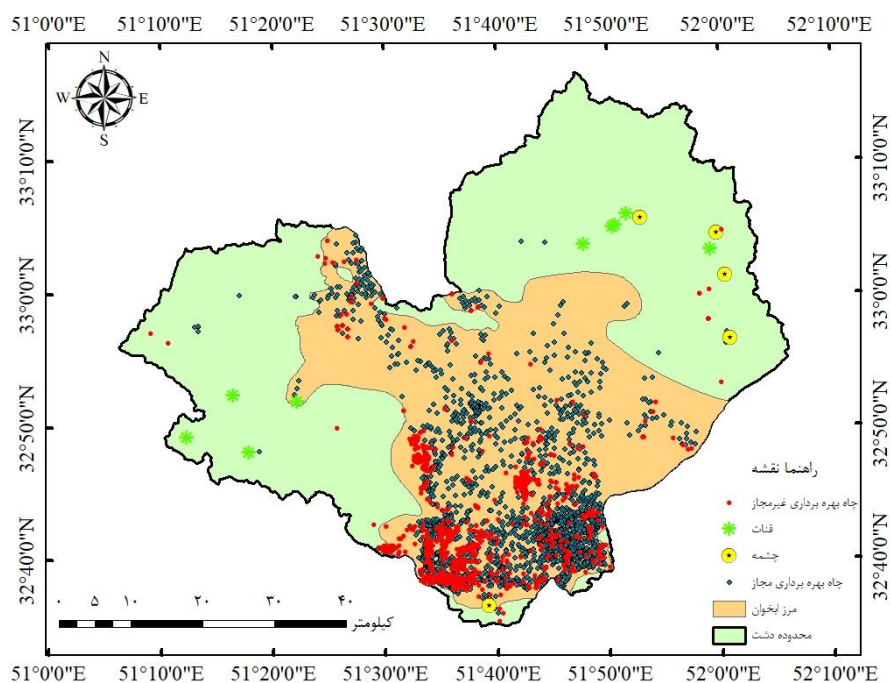
شکل ۴-۷ هیدروگراف معرف آبخوان آبرفتی اصفهان\_برخوار



شکل ۴-۸ افت تجمعی آبخوان اصفهان برخوار برای سال‌های ۱۳۶۱-۱۳۹۷



شکل ۴-۹ منابع تخلیه آب زیرزمینی اعم از چاه‌های مجاز، چاه‌های غیرمجاز، قنات و چشمه‌ها در محدوده مطالعاتی را نشان می‌دهد. محدوده مطالعاتی اصفهان-برخوار شامل ۵۳۳۴ منبع تخلیه آب زیرزمینی است که از این تعداد، ۵۳۲۰ چاه بهره‌برداری مجاز با میزان تخلیه ۵۲۴ میلیون مترمکعب، ۹ رشته قنات با تخلیه ۲/۲ میلیون مترمکعب و ۵ چشمه با تخلیه ۰/۹ میلیون مترمکعب هستند. از کل تعداد ذکر شده، تعداد ۵۲۶۳ حلقه چاه دارای تخلیه ۵۱۸/۲ میلیون مترمکعب و ۱ رشته قنات دارای تخلیه ۱/۱ میلیون مترمکعب در محدوده آبخوان آبرفتی اصفهان-برخوار واقع شده‌اند. جدول ۴-۱۰ اطلاعات موجود درباره تعداد منابع تخلیه و میزان تخلیه هر منبع را به تفکیک دشت، ارتفاعات و محدوده آبخوان نشان می‌دهد.



شکل ۴-۹ موقعیت چاه‌های بهره‌برداری مجاز و غیرمجاز، چشمه و قنات در محدوده اصفهان-برخوار

جدول ۴-۱۰ تعداد منابع و مقدار تخلیه آب زیرزمینی محدوده اصفهان-برخوار (میلیون مترمکعب) [۱۲۰]

نوع منبع	دشت		ارتفاعات		جمع محدوده مطالعاتی		آبخوان آبرفتی	
	تعداد	مقدار تخلیه	تعداد	مقدار تخلیه	تعداد	مقدار تخلیه	تعداد	مقدار تخلیه
چاه	۵۲۸۳	۵۲۰/۹	۳۷	۳/۱	۵۳۲۰	۵۲۴	۵۲۶۳	۵۱۸/۲
چشمه	۱	۰/۴	۴	۰/۵	۵	۰/۹	۰	۰
قنات	۳	۱/۲	۶	۱	۹	۲/۲	۱	۱/۱
جمع کل	۵۲۸۷	۵۲۲/۵	۴۷	۴/۶	۵۳۳۴	۵۲۷/۱	۵۲۶۴	۵۱۹/۳

جدول ۴-۱۱ بیانگر بیلان آب زیرزمینی آبخوان آبرفتی منتهی به سال ۹۰-۱۳۸۹ می‌باشد. بیلان آب زیرزمینی آبخوان بر مبنای تفاضل منع ورودی به آبخوان، شامل: جریان آب زیرزمینی ورودی، میزان نفوذ حاصل از بارندگی، نفوذ جریان‌های سطحی، آب برگشتی مصرف کشاورزی، و آب برگشتی شرب و صنعت از منابع خروجی از آبخوان شامل: جریان زیرزمینی خروجی، میزان تبخیر از آبخوان و میزان تخلیه و برداشت از آب زیرزمینی محاسبه شده است. بر این اساس، با مقایسه جریان‌های ورودی و خروجی می‌توان مشاهده کرد که در حال حاضر با توجه به عدم توازن منابع ورودی و خروجی، در دوره اندازه‌گیری بیلان، ۶۵/۷ میلیون مترمکعب آب بیشتر از حد مجاز از آبخوان برداشت شده است.

**جدول ۴-۱۱ گزارش بیلان آب زیرزمینی در سال آبی ۱۳۹۰-۱۳۸۹ آبخوان اصفهان-برخوار (میلیون مترمکعب) [۱۲۰]**

تغییرات محدودده بیلان	منابع تغذیه					منابع تخلیه						
	جریان زیرزمینی ورودی	نفوذ از بارش	نفوذ از جریان‌های سطحی	نفوذ از آب زراعی	نفوذ از شرب و صنعت	جمع تغذیه	جریان زیرزمینی خروجی	تبخیر از آبخوان	زهکشی	تخلیه از چاه، چشمه و قنات	جمع تخلیه	
۱۶۴۲/۸	۶۵	۳۹	۳۵/۲	۲۳۹/۵	۷۸/۶	۴۵۷/۳	۵۱۹/۳	۰	۱/۷	۲/۱	۵۲۳	-۶۵/۷

**۴-۵-۳- مصارف آب**

جدول ۴-۱۲ میزان مصارف آب از منابع آب زیرزمینی و آب سطحی در سطح دشت، ارتفاعات و آبخوان اصفهان-برخوار را برای مصارف شرب، کشاورزی و صنعت به تفکیک نشان می‌دهد. بر اساس اطلاعات، میزان آب مصرفی کشاورزی در سطح دشت برابر با ۶۴۰/۶ میلیون مترمکعب و در سطح آبخوان برابر با ۶۳۷/۲ میلیون مترمکعب بوده؛ در حالی که مجموع آب مصرفی شرب و صنعت در دشت برابر با ۲۳۶/۶ میلیون مترمکعب و در سطح آبخوان بالغ بر ۲۳۶/۴ میلیون مترمکعب است. با توجه به میزان مصرف بالای آب کشاورزی از هر دو منبع آب سطحی و زیرزمینی، بخش به‌منظور کاهش افت کیفیت و کمیت منابع آب موجود در منطقه مد نظر، مدیریت این بخش از اهمیت بالایی برخوردار است [۶].

**جدول ۴-۱۲ حجم مصارف آبی در آبخوان اصفهان-برخوار در سال آبی ۱۳۸۹-۱۳۹۰ (میلیون مترمکعب) [۱۲۰]**

منبع آب	دشت		ارتفاعات		جمع محدوده مطالعاتی		آبخوان آبرفتی		
	کشاورزی	شرب	کشاورزی	شرب	کشاورزی	شرب	کشاورزی	شرب	
آب زیرزمینی	۵۱۴	۴/۶	۳/۴	۰/۱	۵۱۷/۴	۴/۷	۳/۲	۵۱۰/۶	۴/۴
جریان‌های سطحی	۲۱۶/۳	۱۲۶/۶	۰/۲	۰/۰	۲۱۶/۳	۱۲۶/۸	۲۱۶/۳	۱۲۶/۶	۱۲/۵
جمع کل	۲۱۹/۵	۶۴۰/۴	۳/۶	۰/۱	۲۱۹/۸	۶۴۴/۲	۲۱۹/۵	۶۳۷/۲	۱۶/۹

#### ۴-۶- سیمای اجتماعی- فرهنگی- محدود

در حال حاضر چالش‌های عمده آبخوان اصفهان-برخوار شامل: خشکسالی‌های متعدد، تأمین آب مورد نیاز صنایع، کاهش سطح اعتماد مردم نسبت به حاکمیت، افزایش بیکاری و مهاجرت در شهرستان‌های محدود و برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی که منجر به وقوع پدیده فرونشست در مقیاس وسیع شده است، می‌باشد. در سال‌های اخیر علی‌رغم تلاش‌های صورت گرفته در راستای مدیریت همه‌جانبه منابع آب در محدوده اصفهان-برخوار، به دلیل وجود تعداد زیاد ذی‌نفعان و تضاد منافع آن‌ها، این تلاش‌ها نتیجه‌ای در پی نداشته است. به‌طور کلی، رویارویی با چنین مسائلی بدخیمی در مدیریت منابع آب نیازمند مشارکت آحاد جامعه و شناسایی فاکتورهای رفتاری عوامل انسانی تأثیرگذار در منطقه بوده که مستلزم بررسی جامع مشخصه‌های فرهنگی و اجتماعی جامعه مد نظر است [۱۱۲]. ارزیابی رفتار عوامل انسانی مستلزم ارزیابی ساختار جمعیتی، بافت سنی، سطح تحصیلات و وضعیت اشتغال در محدوده مطالعاتی است. در دستیابی به این مهم، پارامترهای فردی و اجتماعی مؤثر در ساختار فرهنگی جامعه در این بخش بررسی می‌شود. در ابتدا به تراکم جمعیتی شهرها و روستاها در شهرستان‌های مهم محدوده آبخوان پرداخته می‌شود. از آنجائی که آمار جمعیتی نفوس و مسکن به تفکیک شهرستان جمع‌آوری می‌گردد، جمعیت شهرستان‌های مهم واقع در محدوده اصفهان-برخوار بر پایه آخرین آمار سرشماری در سال ۱۳۹۵ در جدول ۴-۱۳ گزارش شده است. باتوجه به این اطلاعات، شهرستان اصفهان بیشترین جمعیت را به خود اختصاص داده و دارای بیشترین نرخ رشد جمعیت است [۱۲۶].

جدول ۴-۱۳ جمعیت ساکن در محدوده اصفهان-برخوار به تفکیک شهرستان [۱۲۶]

شهرستان	جمعیت شهری	جمعیت روستائی	مجموع
اصفهان	۲۱۱۲۷۶۷	۱۳۰۴۶۱	۲۲۴۳۲۲۸
اردستان	۴۷۱۷۱	۱۶۲۳۴	۶۳۴۰۵
برخوار	۱۱۳۸۷۵	۸۵۴۴	۱۲۲۴۱۹
شاهین‌شهر و میمه	۲۲۰۸۸۷	۱۳۷۷۶	۲۳۴۶۶۳
نجف‌آباد	۲۹۶۲۵۵	۲۵۷۸۱	۳۲۲۰۳۶
خمینی‌شهر	۳۱۵۰۵۲	۴۶۷۵	۳۱۹۷۲۷

جدول ۴-۱۴ تعداد افراد بزرگ‌تر از ۱۰ سال، که در بخش‌های کشاورزی، صنعت، خدمات و سایر بخش‌ها مشغول هستند را برای دو سال آماری ۱۳۸۵ و ۱۳۹۰ مشخص می‌کند [۱۲۷]. در اغلب شهرستان‌ها تعداد افراد شاغل در بخش کشاورزی نسبت به سال ۱۳۸۵ به‌عنوان آمار گذشته، کاهش محسوسی داشته است که ریشه در افزایش سن جمعیت کشاورزی، کاهش تمایل کشاورزان به ادامه کار پرزحمت کشاورزی، مهاجرت به شهرها، افزایش سطح تحصیل جوانان و اشتغال آن‌ها در سایر بخش‌ها دارد [۱۱۲].

جدول ۴- ۱۴ تعداد شاغلین بالای ۱۰ سال به تفکیک شهرستان در محدوده اصفهان-برخوار [۱۲۷]

تعداد افراد بالای ۱۰ سال مشغول به کار در فعالیت‌های اقتصادی ( نفر)							
شهرستان	بخش کشاورزی	بخش صنعت	بخش خدمات	بیکار			
	۱۳۸۵	۱۳۹۰	۱۳۸۵	۱۳۹۰	۱۳۸۵	۱۳۸۵	۱۳۹۰
اصفهان	۳۵۹۱۷	۳۴۲۸۰	۲۵۳۳۲۹	۲۲۹۲۶۰	۳۲۹۶۱۰	۳۲۵۶۴۴	۶۳۳۷۷
اردستان	۵۲۱۱	۴۲۱۵	۳۸۶۶	۳۰۱۲	۵۰۴۷	۴۷۱۴	۱۷۰۴
برخوار	۸۲۸۸	۵۱۷۵	۳۸۶۹۰	۱۵۸۰۹	۳۵۲۶۱	۱۱۶۵۷	۳۱۲۵
شاهین شهر و میمه	نامشخص	۳۳۰۸	نامشخص	۱۹۷۰۴	نامشخص	۲۴۶۷۴	۹۱۷۲
نجف‌آباد	۷۳۱۵	۹۱۶۴	۳۷۸۷۴	۳۵۶۲۶	۳۴۴۸۰	۳۳۶۵۲	۱۱۲۶۳
خمینی شهر	۵۴۷۲	۵۴۷۵	۴۲۲۷۴	۳۷۵۵۰	۳۴۶۶۵	۳۵۵۶۰	۱۰۸۸۸

همانطور که پیش‌تر اشاره شد، سطح تحصیل کشاورز می‌تواند در ادامه فعالیت کشاورزی و نحوه مدیریت سهم‌آبه دریافتی تأثیر بسزائی داشته باشد. بدین ترتیب، لازم است تا سطح تحصیل افراد شاغل در کشاورزی بررسی گردد. این مهم با مطالعه گزارش‌های اجتماعی مربوطه و آمارهای موجود از مطالعه‌های پیشین، پیگیری شده است. در این راستا، جدول ۴-۱۵ تعداد افراد شاغل باسواد و بدون تحصیلات را مشخص می‌کند [۱۲۷]. از طرفی، در این مطالعه سطح تحصیلات کشاورزان به ۵ دسته مجزا تقسیم شده است و باتوجه به عدم وجود اطلاعات جزئی از سطح سواد کشاورزان در گزارشات آماری، از اطلاعات موجود در مصاحبه‌های انجام‌شده در پژوهش ذوالفقاری و احمدی در سال ۱۴۰۰ استفاده گردید. در این دسته‌بندی کشاورزان با سطح تحصیل برابر با صفر بی‌سواد، سطح تحصیل برابر با ۰/۲۵ کشاورزان باسواد در سطح ابتدائی، سطح ۰/۵ کشاورزان باسواد راهنمائی، سطح ۰/۷۵ کشاورزان دارای تحصیلات دبیرستان و سطح ۱ کشاورزان دارای تحصیلات دانشگاهی در نظر گرفته شده‌اند. جدول ۴-۱۶، درصد کشاورزان در هر یک از سطوح تحصیلی را مشخص می‌کند [۷۶]. اطلاعات لازم برای تفکیک بافت سنی کشاورزان در مطالعه حاضر مطابق با جدول ۴-۱۷ با استفاده از مصاحبه‌های انجام‌شده در مطالعه ذوالفقاری و احمدی ۱۴۰۰ استخراج شده است. گروه سنی کشاورزان شامل ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ می‌باشد. کشاورزان گروه سنی ۰/۲۵ در محدوده سنی کمتر از ۲۵ سال، گروه سنی ۰/۵ در محدوده ۲۵ تا ۵۰ سال، گروه سنی ۰/۷۵ در محدوده سنی ۵۰ تا ۷۵ سال و در نهایت گروه سنی ۱ کشاورزان در محدوده سنی بیشتر از ۷۵ سال قرار می‌گیرند.

**جدول ۴-۱۵** تعداد افراد شاغل به تفکیک باسواد و بی سواد در محدوده اصفهان-برخوار

شهرستان	باسواد	بی سواد	مجموع
اصفهان	۶۱۴۸۵۸	۳۶۱۴۸	۶۵۱۰۰۶
اردستان	۸۶۵۳	۴۳۲۱	۱۲۹۷۴
برخوار	۳۴۳۳۶	۴۰۴۴	۳۸۳۸۰
شاهین شهر و میمه	۶۱۴۱۵	۲۹۴۶	۲۳۴۶۶۳
نجف آباد	۵۷۶۱۷	۲۵۷۸۱	۸۳۳۹۸
خمینی شهر	۸۲۶۹۹	۶۷۶۶	۸۹۴۶۵

**جدول ۴-۱۶** درصد کشاورزان به تفکیک سطح تحصیل در محدوده اصفهان برخوار

محدوده	سطح تحصیلات کشاورزان				
	۰	۰/۲۵	۰/۵	۰/۷۵	۱
اصفهان-برخوار	۴۵/۳	۴۱/۵	۵/۷	۵/۷	۱/۸
مجموع	۰	۰/۲۵	۰/۵	۰/۷۵	۱

**جدول ۴-۱۷** درصد کشاورزان متعلق به هر گروه سنی در محدوده اصفهان-برخوار

محدوده	درجه سنی کشاورزان			
	۰/۲۵	۰/۵	۰/۷۵	۱
اصفهان-برخوار	۰	۱۳/۲	۷۹/۳	۷/۵
مجموع	۰/۲۵	۰/۵	۰/۷۵	۱

**۴-۷- سیمای کشاورزی**

همانطور که پیش تر نیز اشاره شد، بیشترین میزان آب مصرفی از منابع آب موجود در محدوده اصفهان-برخوار به مصرف کشاورزی اختصاص می یابد؛ بنابراین در این بخش به بررسی پارامترهای مؤثر در این حوزه پرداخته خواهد شد.

**۴-۷-۱- سطح کشت اراضی آبی**

به جهت استخراج مساحت سطح زیر محصولات انتخابی در محدوده اصفهان-برخوار، از اطلاعات در دسترس در جهاد کشاورزی بهره برده شده و همچنین، اطلاعات موجود در زمینه سطح زیر کشت در منطقه، بر اساس شهرستانها تفکیک گردیده است؛ در نتیجه، باتوجه به وجود شهرستانهای برخوار، اردستان، اصفهان، خمینی شهر، شاهین شهر، میمه و نجف آباد که در برخی موارد، تنها قسمتی از آنها در محدوده دشت اصفهان-برخوار قرار دارند، سطح زیر کشت اراضی بر اساس درصد سطوح گزارش شده است. مجموع کل سطوح زیر کشت در شهرستانهای نام برده در ابتدای سال شیبه سازی، یعنی سال ۹۰-۱۳۸۹ برابر با ۴۲۴۱۲ هکتار بوده در حالی که بر اساس گزارش های آب منطقه ای اصفهان، کل سطوح زیر کشت در محدوده آبخوان برابر با ۲۰۸۷۵ هکتار می باشد؛ بنابراین، بر مبنای آمار موجود و سطح زیر

کشت، هر نوع محصول نسبت به کل سطح در شهرستان‌های موردنظر، برای سال‌های شبیه‌سازی یعنی ۹۰-۱۳۸۹ تا ۹۸-۱۳۹۷ استخراج شده است. داده‌های به‌دست آمده، در جدول ۴-۱۸ نشان داده شده است.

جدول ۴-۱۸ درصد سطح کشت محصولات زراعی در محدوده اصفهان-برخوار

محصول	سال								
	۱۳۹۷-۹۸	۱۳۹۶-۹۷	۱۳۹۵-۹۶	۱۳۹۴-۹۵	۱۳۹۳-۹۴	۱۳۹۲-۹۳	۱۳۹۱-۹۲	۱۳۹۰-۹۱	۱۳۸۹-۹۰
گندم	۲۴/۰۲	۲۳/۱۷	۲۶/۵۵	۲۳/۹۴	۲۱/۹۸	۲۴/۵۳	۳۱/۳۰	۳۸/۲۳	۴۲/۸۱
جو	۳۳/۹۸	۲۸/۰۸	۲۸/۲۱	۳۵/۳۳	۳۵/۰۲	۳۵/۴۱	۳۵/۸۶	۲۸/۴۹	۲۷/۰۲
ذرت	۲۲/۵	۲۴/۴۴	۲۳/۲۸	۱۹/۷	۲۴/۳۲	۲۳/۰۲	۱۸/۶۵	۱۷/۴۵	۱۳/۵۱
یونجه	۱۲/۷۸	۱۵/۲۶	۱۳/۶۱	۱۳/۵۸	۱۲/۸۵	۱۳/۱۳	۱۰/۱۵	۱/۱۲	۱۱/۱۳
چغندر	۰/۸۸	۲/۲۵	۱/۸۱	۱/۵۳	۰/۵۴	۰/۶۶	۰/۶۰	۱۱/۵۷	۲/۱۱
خریزه	۵/۸۴	۶/۷۹	۶/۵۲	۵/۹۱	۵/۲۹	۳/۲۶	۳/۴۲	۳/۱۳	۳/۴۲

#### ۴-۷-۲- نیاز خالص آبی محصولات

نیاز خالص آبی الگوی کشت غالب منطقه مطالعاتی اصفهان-برخوار با استفاده از نرم‌افزار NETWAT بر اساس سند ملی آب، تخمین زده شد. بیش از ۹۰ درصد سطح زیر کشت منطقه مربوط به شش محصول گندم، جو، ذرت علوفه‌ای، یونجه، چغندر قند و خربزه بوده که نیاز آبی ماهانه این محصولات در جدول ۴-۱۹ به نمایش درآمده است. با توجه به اطلاعات موجود، بیشترین و کمترین نیاز آبی در میان محصولات به ترتیب به چغندر قند با نیاز آبی برابر با ۹۶۹۰ و جو با ۴۲۱۰ مترمکعب بر هکتار در سال تعلق دارد.

جدول ۴-۱۹ نیاز خالص آبی محصولات زراعی در محدوده اصفهان-برخوار (مترمکعب در هکتار)

نوع محصول	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مجموع
گندم	۰	۹۰	۸۰	۱۹۰	۴۷۰	۹۱۰	۱۴۴۰	۱۵۷۰	۲۲۰	۰	۰	۰	۴۹۷۰
جو	۰	۴۰	۷۰	۱۷۰	۴۵۰	۹۱۰	۱۴۴۰	۱۱۳۰	۰	۰	۰	۰	۴۲۱۰
ذرت علوفه‌ای	۶۵۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۶۰۰	۱۷۷۰	۱۸۵۰	۴۸۷۰
یونجه	۷۸۰	۴۵۰	۰	۰	۰	۰	۹۸۰	۱۳۳۰	۱۵۹۰	۱۶۶۰	۱۵۹۰	۱۲۵۰	۹۶۳۰
چغندر قند	۷۵۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۸۰	۶۰۰	۱۵۷۰	۲۴۵۰	۲۳۸۰	۱۷۶۰	۹۶۹۰
خریزه	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲۱۰	۷۶۰	۱۸۸۰	۲۱۹۰	۱۱۱۰	۰	۶۱۵۰

#### ۴-۷-۳- ضریب حساسیت محصولات به کم آبی

یکی از استراتژی‌های اتخاذ شده از سوی کشاورزان در شرایط تنش آبی و کم آبی، کم آبیاری محصولات کشاورزی است که اولین پیامد طبیعی آن کاهش عملکرد محصولات کشاورزی خواهد بود. در راستای محاسبه میزان کاهش عملکرد محصولات کشاورزی در مقابل تنش آبی، ضریب حساسیت به کم آبی که بر اساس دستورالعمل‌های سازمان خواروبار جهانی F.A.O محاسبه می‌گردد، به کار برده می‌شود. جدول ۴-۲۰ میزان ضریب حساسیت محصولات به کم آبیاری بر اساس کشت غالب در نظر گرفته شده در این پژوهش را مشخص می‌کند. از آنجائی که در این پژوهش از انجام محاسبات برای محصولات باغی خودداری گردیده و فرض بر آن است که تمام نیاز آبی محصولات باغی تأمین می‌شود، از آوردن اطلاعات مربوط به محصولات باغی صرف نظر شده است [۱۲۸].

جدول ۴-۲۰ ضریب حساسیت به تنش آبی محصولات زراعی [۱۲۹]

محصول	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور
گندم	۰	۰/۴۷	۰/۶	۰/۶	۰/۶	۰/۶	۰/۵	۰/۴۳	۰/۲۷	۰	۰	۰
جو	۰	۰/۵۷	۰/۵	۰/۴۳	۰/۲۷	۰/۱۷	۰/۱۷	۰/۱۷	۰	۰	۰	۰
ذرت علوفه‌ای	۰/۴۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۴	۱/۲	۱/۲
یونجه	۱/۱	۱/۱	۰	۰	۰	۰	۱/۱	۱/۱	۱/۱	۱/۱	۱/۱	۱/۱
چغندر قند	۰/۷	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۶	۰/۶	۱	۱/۱	۱/۱	۱
خریزه	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱/۱	۱/۱	۱/۳	۱/۳	۱/۱	۰

#### ۴-۷-۴- عملکرد محصولات

از دیگر پارامترهای مؤثر در سود اقتصادی ناشی از کشاورزی و محاسبات میزان تولیدات خالص کشاورزی، عملکرد محصولات است. جدول ۴-۲۱ میزان عملکرد محصولات در طول سال‌های شبیه‌سازی یعنی ۹۰-۱۳۸۹ تا ۹۸-۱۳۹۷ را نمایش می‌دهد که از اطلاعات منتشر شده توسط جهاد کشاورزی حاصل شده است. بر این اساس، بیشترین میزان عملکرد در بین محصولات زراعی متعلق به ذرت علوفه‌ای به میزان ۶۲۰۰۰ کیلوگرم در هکتار و کمترین میزان مربوط به گندم به مقدار ۳۴۰۰ کیلوگرم در هکتار است.

جدول ۴- ۲۱ عملکرد محصولات زراعی ( کیلوگرم در هکتار)

محصول	سال								
	۹۷-۹۸	۹۶-۹۷	۹۵-۹۶	۹۴-۹۵	۹۳-۹۴	۹۲-۹۳	۹۱-۹۲	۹۰-۹۱	۸۹-۹۰
گندم	۴۵۰۰	۴۸۰۰	۴۲۰۰	۴۵۰۰	۴۰۰۰	۴۰۰۰	۴۶۹۰	۴۴۰۰	۳۴۰۰
جو	۴۳۰۰	۴۵۰۰	۴۰۵۰	۴۲۰۰	۳۶۰۰	۴۰۰۰	۴۲۰۰	۳۷۰۰	۴۰۰۰
ذرت علوفه‌ای	۵۵۰۰۰	۶۰۰۰۰	۵۵۰۰۰	۶۰۰۰۰	۶۰۰۰۰	۵۰۰۰۰	۵۵۰۰۰	۶۵۰۰۰	۶۲۰۰۰
یونجه	۱۰۰۰۰	۱۰۰۰۰	۱۰۰۰۰	۱۱۰۰۰	۱۱۰۰۰	۱۰۸۰۰	۱۱۳۰۰	۱۰۸۷۵	۱۱۰۰۰
چغندر قند	۴۵۰۰۰	۴۴۷۸۸	۴۱۵۶۱	۳۵۹۸۱	۴۳۷۵۲	۳۱۵۵۴	۲۹۵۷۴	۳۶۵۱۶	۳۱۵۸۸
خریزه	۳۰۰۰۰	۳۵۰۰۰	۳۰۰۰۰	۳۰۰۰۰	۲۷۰۰۰	۲۶۵۰۰	۳۲۰۰۰	۲۷۰۰۰	۲۸۴۹۰

## ۴-۷-۵ راندمان آبیاری

تلفات ناشی از استفاده از سیستم‌های آبیاری دلایل متنوعی مانند: نفوذ آب از جدار کانال‌ها، نفوذ آب به خارج از منطقه توسعه ریشه‌ها، رواناب‌های سطحی و تبخیر از سطح است. عملکرد یک سیستم آبیاری، تعریفی از راندمان انتقال آب به مزرعه توسط سیستم آبیاری، یکنواختی توزیع آب در مزرعه و کاربرد سیستم آبیاری در مزرعه می‌باشد. راندمان آبیاری به جهت تخمین میزان نیاز ناخالص آبی گیاه کشت شده، برآورد می‌گردد. بر اساس جلد ۲۱ مطالعات بهنگام‌سازی طرح جامع آب کشور، راندمان آبیاری در محدوده اصفهان\_برخوار برابر با ۰/۳۴۶ در نظر گرفته شد.

## ۴-۷-۶ اقتصاد کشاورزی

یکی از عوامل دخیل در فرآیند کشت یک محصول برآورد میزان هزینه‌های لازم برای کاشت، داشت و برداشت محصول در مقابل میزان درآمد حاصل از کشت بر اساس قیمت فروش محصول، سطح زیر کشت و عملکرد آن است. بدین ترتیب، در این پژوهش میزان هزینه‌های مربوط به کشاورزی و قیمت فروش محصولات به صورت سالانه برای دوره نه ساله مدل‌سازی، از گزارش‌های سازمان جهاد کشاورزی استخراج و در فرآیند شبیه‌سازی استفاده شده است. مقادیر سطح زیر کشت، هزینه کشاورزی و قیمت فروش محصولات برای آخرین سال شبیه‌سازی یعنی ۹۸-۱۳۹۷ به عنوان نمونه در جدول ۴-۲۲ ارائه گردیده است.

جدول ۴- ۲۲ هزینه کشاورزی و قیمت فروش محصولات سال آبی ۱۳۹۷

محصول	سطح کشت (هکتار)	سطح کشت (%)	هزینه (ریال بر هکتار)	قیمت فروش (ریال بر کیلوگرم)
گندم	۹۱۹۱	۲۴.۰۲	۵۶۸۹۸۱۳۰	۱۴۷۰۰
جو	۱۳۰۰۰	۳۳.۹۷	۵۴۹۲۴۰۸	۱۱۶۳۹
ذرت	۸۶۱۰	۲۲.۵	۹۰۰۰۵۱۳۰	۷۸۹۰
یونجه	۴۸۹۰	۱۲.۷۸	۷۷۸۸۱۷۱۰	۲۶۰۰۰
چغندر قند	۳۳۵	۰.۸۷	۱۰۰۴۵۳۲۱۰	۳۴۰۳
خریزه	۲۲۳۶	۵.۸۴	۱۱۱۴۲۸۹۱۰	۷۸۹۰



#### ۴-۸- اهداف انتخاب محدوده مطالعاتی

آبخوان اصفهان\_برخوار، یکی از آبخوان‌های دارای بیلان منفی است که از سال ۱۳۴۹ بر اساس گزارش‌های وزارت نیرو جزء دشت‌های ممنوعه بحرانی در توسعه و برداشت از آب‌های زیرزمینی شناخته شده است. ضمن اینکه، افت سطح آب در این آبخوان از سالیان دور به مقدار قابل ملاحظه‌ای منفی بوده که شدت بحران را در این حوضه در مقایسه با سایر آبخوان‌ها گوشزد می‌نماید. در این راستا، حوضه مطالعاتی جزء آبخوان‌های ممنوعه بحرانی شناخته شده و مشمول مقررات خاص، به جهت بهبود شرایط هیدرولوژیکی آن است. بخش عمده‌ای از منابع آب زیرزمینی (بالغ بر ۷۰٪) در این محدوده به مصرف کشاورزی می‌رسد که خود به تنهایی گویای سطح اهمیت مدیریت آب در بخش کشاورزی است [۱۳۰].

#### ۴-۹ جمع‌بندی

روش‌های مطالعاتی پژوهش حاضر، در محدوده آبخوان اصفهان\_برخوار اعمال شده است. در این فصل، ابتدا به بررسی ویژگی‌های جغرافیائی و فیزیکی محدوده موردنظر پرداخته شد؛ سپس، با ارزیابی منابع آب موجود شامل: منابع آب سطحی و زیرزمینی، میزان مصارف و بیلان منابع آب به تفکیک مصارف کشاورزی، شرب و صنعت ارائه گردید. باتوجه به داده‌های به دست آمده، کشاورزی در محدوده اصفهان\_برخوار با در اختیار داشتن بالغ بر ۷۰ درصد منابع آب موجود، بزرگ‌ترین مصرف‌کننده در محدوده مطالعاتی است که این امر لزوم مدیریت آب کشاورزی در این محدوده را آشکار می‌سازد. از فاکتورهای مهم در تولید محصولات کشاورزی و انتخاب الگوی کشت توسط کشاورز، مقادیر هزینه و قیمت فروش محصولات کشاورزی کشت شده است که بر اساس گزارش‌های موجود ارائه گردید. در مدیریت جامع آب کشاورزی، لازم است که فاکتورهای اقتصادی به دقت مورد مطالعه قرار گیرد. در نهایت، کشاورزی یک فعالیت فرهنگی\_اجتماعی است که آحاد کشاورزان به عنوان عوامل انسانی تأثیرگذار، بر اساس ویژگی‌های خاص شخصیتی و فردی خود تصمیم‌گیری می‌کنند؛ بدین سبب، شناخت ساختار اجتماعی جامعه محدوده اصفهان\_برخوار در این بخش دنبال شد.

## فصل پنجم

### نتایج حاصل از به کارگیری روش تحقیق در محدوده مطالعاتی

#### ۵-۱- مقدمه

در این فصل نتایج حاصل از اعمال چارچوب پیشنهادی در محدوده مطالعاتی اصفهان\_برخوار بررسی می‌گردد. باتوجه به توسعه مدل آب زیرزمینی به منظور ارزیابی تغییرات تراز آب در طول مدل‌سازی، ابتدا فرضیات اولیه در توسعه مدل و سپس نتایج شبیه‌سازی تراز آب زیرزمینی در حالت ماندگار و ناماندگار مورد بررسی قرار گرفته و در ادامه، برای تعیین ساختار رفتاری محدوده، نتایج شبیه‌سازی اجتماعی در مدل عامل‌بنیان تحلیل می‌شود. پس از آن به جهت ارزیابی دقت نتایج به دست آمده، نتایج حاصل از صحت‌سنجی و فرآیند کالیبراسیون مدل پیشنهادی ارائه می‌گردد. در نهایت، با تحلیل نتایج حاصل شده از سناریوهای مختلف اقتصادی، اجتماعی و بازار آب، چگونگی تأثیرگذاری هر مورد بر بهبود شرایط منطقه تحلیل می‌گردد.

#### ۵-۲- نتایج شبیه‌سازی آب زیرزمینی

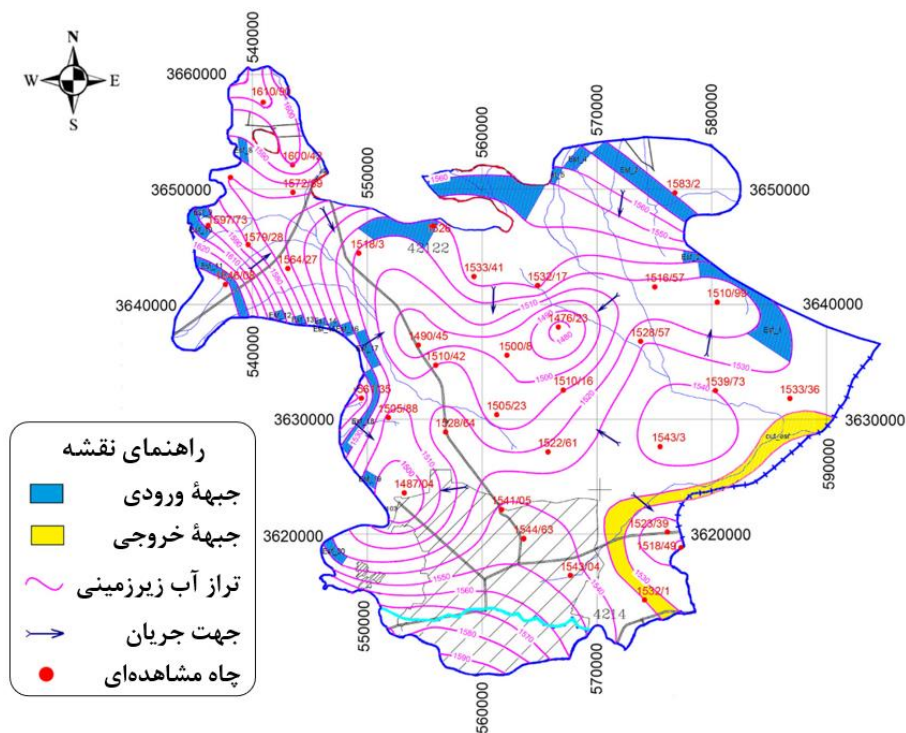
در این بخش، ابتدا فرضیات اولیه شبیه‌سازی در توسعه مدل مفهومی، انتخاب گام‌های زمانی، واسنجی و صحت‌سنجی مدل پیشنهادی و پس از آن، نتایج توسعه مدل به تفکیک در دو بخش مجزا شامل حالت ماندگار و حالت ناماندگار ارزیابی می‌شود.

#### ۵-۲-۱- ملاحظات اولیه توسعه مدل آب زیرزمینی

فرضیات اعمال شده در مدل هیدرولوژیکی موارد زیر را در بر می‌گیرد:

- (۱) شبیه‌سازی آب زیرزمینی در یک دوره نه‌ساله، از سال آبی ۹۰-۱۳۸۹ تا ۹۸-۱۳۹۷ با گام زمانی ماهانه انجام شده است که باتوجه به وجود گزارش بیلان برای سال آبی ۹۰-۱۳۸۹، این سال برای شروع مدل‌سازی انتخاب گردید.
- (۲) اطلاعات مرتبط با میزان تخلیه از چاه‌های بهره‌برداری تنها برای سال ۹۰-۱۳۸۹ موجود بود؛ به همین سبب، داده‌های چاه‌های بهره‌برداری بر پایه آمار اولیه موجود به مدل معرفی و نرخ برداشت در گام‌های زمانی بعدی باتوجه به داده‌های سطح زیر کشت در محدوده مطالعاتی تخمین زده شد. در ابتدا نسبت مقدار تخلیه سالانه از چاه و سطح زیر کشت چاه‌های بهره‌برداری مشخص و با در نظر گرفتن اطلاعات موجود از سطح زیر کشت در گام‌های زمانی دیگر، میزان تخلیه اولیه محاسبه گردید. همچنین، باتوجه به عدم قطعیت مقادیر محاسبه‌شده، مقادیر نهائی تخلیه در فرآیند مدل‌سازی در حالت ناماندگار کالیبره شدند.
- (۳) تعداد کل چاه‌های مشاهداتی در محدوده مطالعاتی برابر با ۳۵ چاه بوده که باتوجه به وجود کامل نبودن اطلاعات مرتبط با چاه‌های مشاهداتی و همچنین خطای داده‌های برداشت‌شده، تعدادی از چاه‌ها در فرآیند مدل‌سازی حذف گردید. در نهایت، تعداد ۲۵ چاه مشاهداتی به‌منظور انجام کالیبراسیون در نظر گرفته شد.
- (۴) یکی از اطلاعات بسیار مهم در فرآیند شبیه‌سازی آب زیرزمینی، داده سنگ بستر محدوده است. در این مطالعه، باتوجه به تعداد کم اطلاعات موجود از چاه‌های اکتشافی و مشاهداتی، از داده‌های برخی از چاه‌های بهره‌برداری در تخمین اولیه سنگ بستر استفاده به عمل آمد. در آخر، سنگ بستر نهائی با اعمال درون‌یابی اطلاعات موجود و نیز انجام سعی و خطا به‌منظور هموارتر کردن سطوح سنگ بستر اولیه تشکیل شد.
- (۵) در محدوده مطالعاتی اصفهان-برخوار دو تصفیه‌خانه شمال و شاهین‌شهر قرار دارد. از آنجاکه تعدادی از زمین‌های کشاورزی واقع در محدوده تصفیه‌خانه شمال از پساب خروجی این تصفیه‌خانه آب موردنیاز خود را تأمین می‌کنند، تراز چاه مشاهداتی که در محدوده پایگاه هشتم شکاری و در نزدیکی مرز آبخوان‌های اصفهان-برخوار و کوهپایه-سگزی واقع شده، بالا آمده است. بخش میانی آبخوان نیز تحت تأثیر وجود تصفیه‌خانه شاهین‌شهر، بالا آمدگی تراز آبخوان را تجربه کرده است؛ بنابراین، بر اساس نقشه‌های جغرافیایی موجود، نفوذ سطحی بیشتری متأثر از وجود این دو تصفیه‌خانه در مدل مفهومی معرفی گردیده که مقدار آن در فرآیند کالیبراسیون مدل تعیین شده است.
- (۶) مرزهای ورودی و خروجی آبخوان با رسم خطوط هم‌تراز آب زیرزمینی و بر مبنای گزارش‌های بیلان شناسائی شده؛ همانطور که در شکل ۵-۱ قابل مشاهده است، مرزهای جریان آب زیرزمینی ورودی و خروجی در محدوده شناسائی شده و به مدل مفهومی معرفی گردیده‌اند. در مدل MODFLOW شرایط مرزی مختلفی

برای جبهه‌های ورودی و خروجی جریان زیرزمینی از جمله شرایط مرزی با بار ثابت<sup>۱</sup>، مرز بدون جریان<sup>۲</sup>، مرز با تغییرات سطح آب<sup>۳</sup> تعریف می‌شود. با توجه به شرایط آبخوان، نوع جبهه‌های ورودی و خروجی به صورت شرایط مرزی عمومی (GHB) در نظر گرفته شده که مقدار جریان ورودی و خروجی با توجه به تراز سطح آب در مرزها متغیر است.



شکل ۵-۱ محل جبهه‌های ورودی و خروجی در محدوده اصفهان-برخوار [۱۳۱]

(۷) ابعاد شبکه‌بندی یک آبخوان به عوامل مختلفی مانند مساحت آبخوان، دقت مورد نیاز برای مدل‌سازی و هدف توسعه مدل بستگی دارد. در این مطالعه با توجه به شرایط فیزیکی، مساحت آبخوان و همچنین با استناد به سایر مطالعات ابعاد سلول‌ها برابر با  $500 \times 500$  متر مربع در نظر گرفته شد. بدین ترتیب، مدل مفهومی شامل ۱۳۴ ستون و ۱۱۷ ردیف بوده است که در مجموع ۶۵۰۵ سلول آن فعال هستند. نحوه شبکه‌بندی آبخوان و مرزهای تعریف شده در شکل ۵-۲ آورده شده است.

(۸) اصلی‌ترین منبع آب سطحی در محدوده رودخانه زاینده‌رود بود که از محدوده نجف‌آباد وارد شده و با گذر از دشت اصفهان-برخوار در محدوده‌ای به طول ۱۷۶۵۱ متر و عرض متوسط ۴۵ متر، وارد دشت

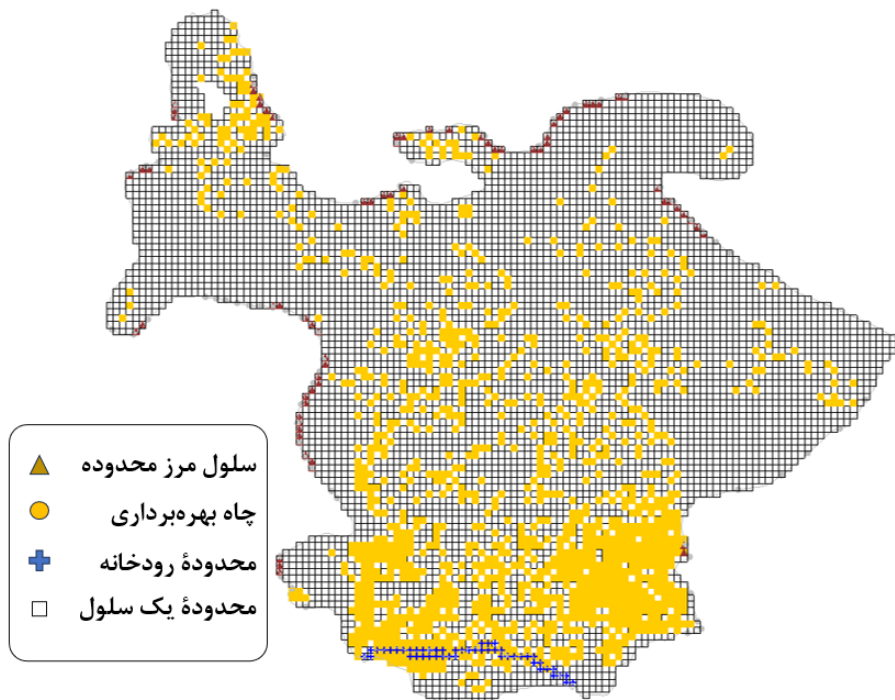
<sup>1</sup> Constant Head

<sup>2</sup> No-flow

<sup>3</sup> General Head Boundary (GHB)

کوهپایه-سگزی می‌شود. بسته رودخانه در کد MODFLOW برای شبیه‌سازی تبادلات بین رودخانه و آبخوان استفاده گردید. اطلاعات موردنیاز این بسته، ارتفاع متوسط آب در رودخانه، ارتفاع کف رودخانه و ضریب هدایت هیدرولیکی بستر رودخانه را شامل می‌شود. نظر به غیردائمی بودن جریان رودخانه زاینده‌رود، از اطلاعات ایستگاه‌های هیدرومتری برای مشخص کردن ارتفاع سطح آب و ارتفاع رودخانه از سطح دریا استفاده به عمل آمد [۱۳۲]؛ مقادیر نهائی پارامترهای مؤثر در فرآیند واسنجی مدل، مشخص شده است.

(۹) چهار نوع لایه در مدل MODFLOW برای شبیه‌سازی آبخوان تعیین شد. لایه نوع صفر نشانگر آبخوان تحت فشار، لایه نوع ۱ آبخوان آزاد، نوع ۲ ترکیبی از آبخوان آزاد و تحت فشار، و لایه نوع ۳ تبدیل آبخوان آزاد به تحت فشار است. مطابق با گزارش‌های بیلان، محدوده اصفهان-برخوار در این مطالعه تک‌لایه و به صورت آبخوان آزاد شبیه‌سازی می‌شود.



شکل ۵-۲ نحوه شبکه‌بندی محدوده اصفهان-برخوار

#### ۵-۲-۲ نتایج اجرای مدل در حالت ماندگار

با توسعه مدل مفهومی در نرم‌افزار GMS بر اساس فرضیات مشخص شده، در ابتدا لازم است تا مدل در حالت ماندگار اجرا شود. مدل‌سازی در حالت ماندگار برای مهرماه ۱۳۸۹ به دلیل نوسانات پائین سطح آب زیرزمینی انجام شد. در واقع این گام زمانی به‌عنوان شروع فرآیند مدل‌سازی در نظر گرفته شده است. در این حالت، پارامترهای تأثیرگذار در

شبیه‌سازی آبخوان اعم از نفوذ سطحی، هدایت هیدرولیکی، مقادیر تغذیه و تخلیه آبخوان، بر مبنای گزارش‌های بیلان محدوده و نتایج موجود از آزمایش‌های پمپاژ به مدل وارد می‌شود.

با توجه به خطای موجود در اطلاعات و پارامترهای اولیه، تراز شبیه‌سازی شده و مشاهداتی در اولین اجرای مدل با یکدیگر تفاوت زیادی داشتند. بهبود خطای مدل در حالت ماندگار و کاهش تفاوت تراز محاسباتی و مشاهداتی از طریق کالیبراسیون دو مقدار ضریب هدایت هیدرولیکی و نفوذ سطحی از بارش و پساب صورت می‌گیرد. به همین منظور، با انجام کالیبراسیون مدل در حالت ماندگار به دو روش سعی و خطا و روش خودکار موسوم به PEST تلاش شد تا اختلاف تراز مشاهداتی و محاسباتی در مدل توسعه یافته بر اساس معیار خطای  $RMSE^1$  به زیر ۱ متر کاهش یابد. مقدار تراز مشاهداتی و محاسباتی در مدل توسعه یافته برای ۲۵ چاه مشاهداتی مطابق با جدول ۵-۱ است. شاخص خطای  $RMSE$  و  $MAE^2$  برای مدل در حالت ماندگار در جدول ۵-۲ آورده شده است. به طور کلی، مقدار خطای کلی مدل و خطای هر یک از چاه‌های مشاهداتی در حالت ماندگار قابل قبول بوده و نیاز است تا شبیه‌سازی در حالت ناماندگار نیز انجام شود.

---

<sup>1</sup> Root Mean Squared Error (RMSE)

<sup>2</sup> Mean Absolute Error (MAE)

جدول ۵-۱ تراز آب زیرزمینی مشاهداتی و محاسباتی در چاه‌های مشاهداتی محدوده اصفهان-برخوار در حالت ماندگار

شماره چاه در مدل	نام چاه مشاهداتی	طول جغرافیائی	عرض جغرافیائی	تراز مشاهداتی (متر)	تراز محاسباتی (متر)	اختلاف (متر)
Point 1	اتوبان شاهین شهر	۵۵۵۹۸۲	۳۶۳۴۷۰۴	۱۵۱۰/۵۰	۱۵۱۰/۴۴۷	۰/۰۵۳
Point 2	امین آباد	۵۵۳۲۳۸	۳۶۲۳۶۰۷	۱۴۹۱/۱۵	۱۴۹۰/۵۸۳	۰/۵۶۷
Point 4	آخر جاده جعفرآباد	۵۵۵۷۵۰	۳۶۴۶۸۰۵	۱۵۲۷/۶۷	۱۵۲۷/۵۲۳	۰/۱۴۷
Point 5	آدر مناباد	۵۶۷۰۷۹	۳۶۳۲۵۵۷	۱۵۱۲/۰۹	۱۵۱۲/۰۱۶	۰/۰۷۴
Point 6	بین حبیب آباد و کمشچه	۵۷۳۸۰۹	۳۶۳۶۷۸۲	۱۵۲۹/۲۵	۱۵۲۸/۹۷۹	۰/۲۷۱
Point 8	پروانه	۵۸۶۸۱۲	۳۶۳۱۸۳۹	۱۵۳۳/۰۶	۱۵۳۲/۸۰۲	۰/۲۵۸
Point 9	پل سرهنگ	۵۶۷۶۹۷	۳۶۱۶۴۴۷	۱۵۴۳/۰۹	۱۵۴۳/۰۱۹	۰/۰۷۱
Point 10	تقاطع اتوبان خورزوق	۵۶۱۷۰۷	۳۶۲۲۱۵۴	۱۵۴۱/۵۰	۱۵۴۱/۴۳۴	۰/۰۶۶
Point 11	جاده دنی	۵۷۶۷۹۴	۳۶۴۹۶۹۴	۱۵۸۴/۰۱	۱۵۸۴/۲۲۱	-۰/۲۱۱
Point 12	جاده سین	۵۶۱۲۸۵	۳۶۳۰۴۲۲	۱۵۰۹/۵۵	۱۵۰۹/۵۲۸	۰/۰۲۲
Point 14	حد فاصل یاقوت آباد و قندنور	۵۴۳۱۰۵	۳۶۴۳۱۲۵	۱۵۶۵/۲۷	۱۵۶۵/۲۷۲	-۰/۰۰۲
Point 15	خاتون آباد	۵۷۴۱۵۱	۳۶۱۴۳۱۷	۱۵۳۳/۵۶	۱۵۳۳/۵۳۰	۰/۰۳۰
Point 16	خمینی شهر بلوار دانشجو	۵۴۷۴۸۰	۳۶۱۸۱۲۰	۱۵۳۷/۴۹	۱۵۳۷/۵۵۱	-۰/۰۶۱
Point 17	رحمت آباد	۵۸۰۳۲۳	۳۶۳۲۵۱۸	۱۵۳۹/۴۰	۱۵۳۹/۲۴۵	۰/۱۵۵
Point 18	زمان آباد	۵۷۶۱۴۱	۳۶۲۰۲۰۷	۱۵۲۳/۸۹	۱۵۲۳/۷۹۳	۰/۰۹۷
Point 19	سه راهی سهل آباد	۵۶۵۷۵۲	۳۶۲۷۱۸۲	۱۵۲۳/۶۱	۱۵۲۳/۴۸۶	۰/۱۲۴
Point 20	سین	۵۶۲۱۷۶	۳۶۳۵۵۷۲	۱۵۰۱/۵۱	۱۵۰۱/۴۹۶	۰/۰۱۴
Point 21	شاپورآباد	۵۶۴۸۵۲	۳۶۴۱۶۴۳	۱۵۳۱/۸۲	۱۵۳۱/۲۸۸	۰/۵۳۲
Point 24	قلعه دوقلو	۵۴۳۵۴۶	۳۶۴۹۷۳۳	۱۵۷۶/۷۵	۱۵۷۶/۷۶۸	-۰/۰۱۸
Point 27	کارخانه قدس	۵۴۹۵۱۰	۳۶۳۱۸۵۹	۱۵۶۱/۵۸	۱۵۶۱/۴۸۳	۰/۰۹۷
Point 30	گز مجاور اتوبان	۵۵۶۸۷۳	۳۶۲۸۹۰۶	۱۵۳۰/۶۷	۱۵۳۰/۳۴	۰/۳۳۰
Point 31	محمود آباد	۵۵۹۳۰۶	۳۶۴۲۴۲۹	۱۵۳۳/۶۱	۱۵۳۳/۲۹۸	۰/۳۱۲
Point 33	یاقوت آباد جدید	۵۳۶۱۷۰	۳۶۴۶۸۶۲	۱۵۹۹/۲۶	۱۵۹۹/۲۰۳	۰/۰۵۷
Point 34	یاقوت آباد قدیم	۵۳۹۶۴۷	۳۶۴۵۲۰۲	۱۵۷۹/۸۵	۱۵۷۹/۸۴۵	۰/۰۰۵
Point 35	یونارت	۵۶۳۶۳۵	۳۶۱۹۶۳۷	۱۵۴۴/۳۶	۱۵۴۴/۳۱۸	۰/۰۴۲

جدول ۵-۲ خطای مدل در حالت ماندگار

مرحله	گام مدل‌سازی	MAE	RMSE
واسنجی	مهر ۱۳۸۹	۰/۱۴	۰/۲۲

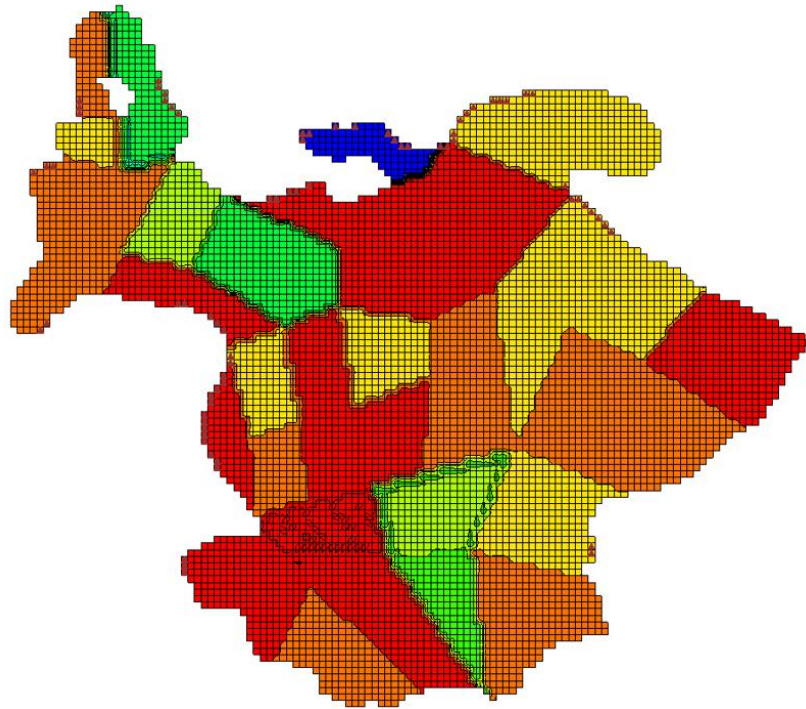
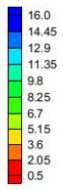
### ۵-۲-۳- نتایج اجرای مدل در حالت ناماندگار

با اتمام فرآیند کالیبراسیون و توسعه مدل ماندگار، شبیه‌سازی آب زیرزمینی در حالت ناماندگار برای ۸۴ گام زمانی از سال ۱۳۹۰-۱۳۸۹ تا ۱۳۹۶-۱۳۹۵ صورت گرفت؛ در این حالت، با فرض کالیبره شدن مقادیر تغذیه سطحی و هدایت هیدرولیکی در آبخوان، مقادیر آبدهی ویژه بر اساس اطلاعات موجود به مدل معرفی گردید. در حالت ناماندگار به جهت بهبود خطای مدل در طول دوره شبیه‌سازی، لازم است مقادیر ضریب آبدهی ویژه کالیبره شود. در این حالت نیز مشابه با مدل ماندگار، فرآیند کالیبراسیون ابتدا به شکل دستی و با تغییر مقادیر آبدهی ویژه اولیه اجرا می‌گردد؛ سپس، به منظور بهبود خطا، کالیبراسیون به روش خودکار موسوم به PEST اجرا می‌شود تا اختلاف تراز مشاهداتی و محاسباتی به حد مطلوب نزدیک‌تر شود. در نهایت، با اتمام فرآیند شبیه‌سازی و کالیبراسیون در حالت ناماندگار، نتایج مقادیر هدایت هیدرولیکی آبخوان و مقادیر آبدهی ویژه به ترتیب مطابق با شکل‌های ۵-۳ و ۵-۴ آورده شده است. در این مطالعه، تعیین مقادیر نهائی هدایت هیدرولیکی و ضریب آبدهی ویژه با تغییر مقادیر پارامترها در محدوده نواحی مشخص شده به جای تغییرات در نقاط مشخص صورت گرفته و معیار بهبود خطای مدل توسعه یافته، کاهش خطای RMSE به کمتر از ۲ متر در حالت ناماندگار بوده است.

مطابق با مقادیر واسنجی شده، ضریب هدایت هیدرولیکی در محدوده آبخوان اصفهان\_برخوار بین ۰/۵ تا ۱۶ متربرروز متغیر است که با محدوده اعداد گزارش شده در گزارش بیلان آبخوان مطابقت دارد؛ متوسط مقدار هدایت هیدرولیکی برای محدوده آبخوان برابر با ۳/۵۱ متربرروز محاسبه شده است. با توجه به با مقادیر گزارش شده، مقدار این ضریب در گستره آبخوان تغییرات زیادی را نشان نمی‌دهد و در بیشتر نقاط محدوده آبخوان، به ویژه بخش‌های مرکزی و رو به جبهه‌های خروجی، در محدوده ۰/۵ تا ۵ متربرروز تغییر می‌کند. متوسط ضریب آبدهی ویژه نیز بر اساس مقادیر واسنجی شده برابر با ۰/۰۵۹ است که با مقدار گزارش شده این پارامتر توسط شرکت مهندسی مشاور جاماب (۰/۰۶) همخوانی دارد.

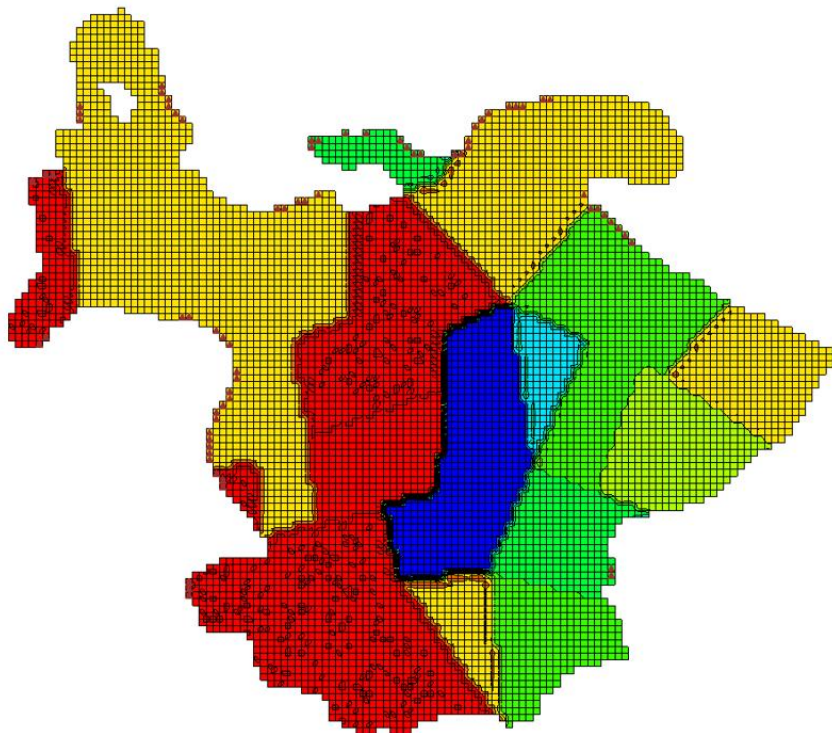
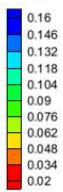


هدایت هیدرولیکی



شکل ۵-۳ مقادیر کالیبره شده هدایت هیدرولیکی در محدوده اصفهان-برخوار (متربروز)

آبدهی ویژه



شکل ۵-۴ مقادیر کالیبره شده آبدهی ویژه در محدوده اصفهان-برخوار

شبیه‌سازی تراز آب زیرزمینی به دو صورت ماندگار و ناماندگار با اجرای کالیبراسیون مقادیر هدایت هیدرولیکی، ضریب آبدهی ویژه و تغذیه سطحی در مدل اجرا گردیده و مدل واسنجی شده برای مدت زمان هفت سال، به صورت گام زمانی ماهانه توسعه یافته است. در این مرحله لازم است صحت مدل توسعه یافته با استفاده از پارامترهای کالیبره شده در یک دوره مشخص سنجیده شود؛ بدین ترتیب، مدل در یک گام زمانی ۲۴ ماهه از ۱۳۹۶-۱۳۹۵ تا ۱۳۹۸-۱۳۹۷ اجرا شد. در صورتی که خطای دوره صحت‌سنجی مدل در بازه قابل قبولی باشد، صحت مدل توسعه یافته تأیید می‌شود. با اتمام فرآیند واسنجی و صحت‌سنجی، دقت مدل بر مبنای دو معیار میانگین خطای مطلق<sup>۱</sup> (MAE) و ریشه میانگین مربعات خطا<sup>۲</sup> (RMSE) که نحوه محاسبه آن‌ها به ترتیب در دو رابطه ۳-۲۵ و ۳-۲۶ آورده شده است، سنجیده شد. میزان خطای مدل آب زیرزمینی در هر سه حالت واسنجی، صحت‌سنجی و کلی در جدول ۵-۳ نمایش داده شده است.

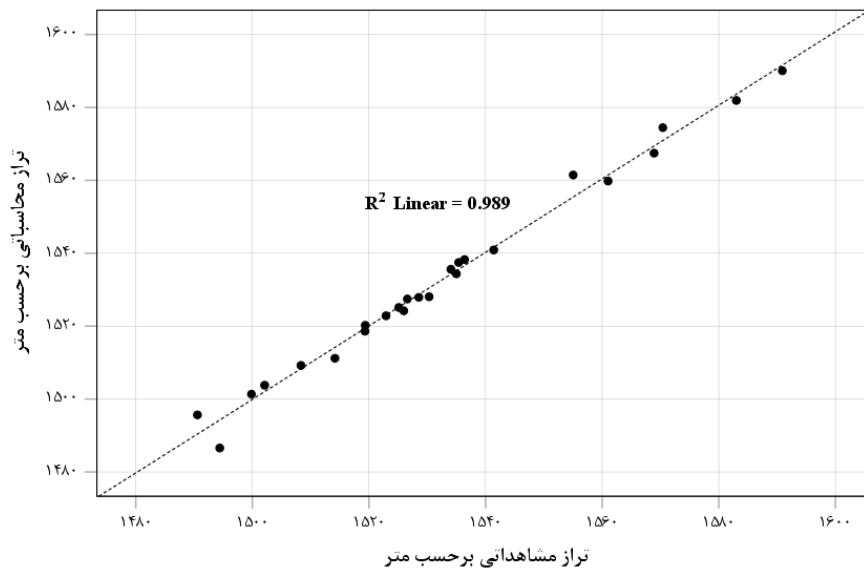
جدول ۵-۳ خطای مدل آب زیرزمینی محدوده اصفهان\_برخوار

مرحله	دوره شبیه‌سازی	MAE	RMSE
واسنجی	مهر ۱۳۸۹ تا شهریور ۱۳۹۶	۱/۲۷۸۷	۱/۴۸۱۲
صحت‌سنجی	مهر ۱۳۹۶ تا شهریور ۱۳۹۸	۱/۸۶۶۹	۱/۹۷۵۵
کل دوره	مهر ۱۳۸۹ تا شهریور ۱۳۹۸	۱/۴۰۹۵	۱/۶۳۹۰

همانطور که مشهود است تمامی معیارهای محاسباتی زیر ۲ متر بوده و ارزیابی خطای مدل، عملکرد مناسب مدل هیدرولوژیکی در شبیه‌سازی وضعیت آبخوان را نشان می‌دهد. سطح آب زیرزمینی مشاهداتی نسبت به سطح آب محاسباتی در تمامی چاه‌های مشاهداتی منطقه در آخرین گام زمانی مطابق با شکل ۵-۵ است؛ بر اساس این نمودار معیار  $R^2$  نیز وضعیت مناسبی را نشان می‌دهد.

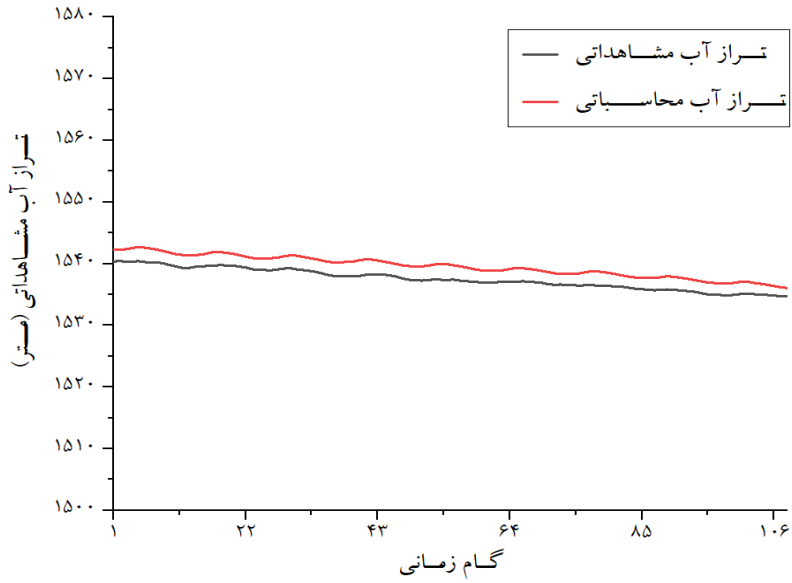
<sup>۱</sup> Mean Absolute Error (MAE)

<sup>۲</sup> Root Mean Squared Error (RMSE)

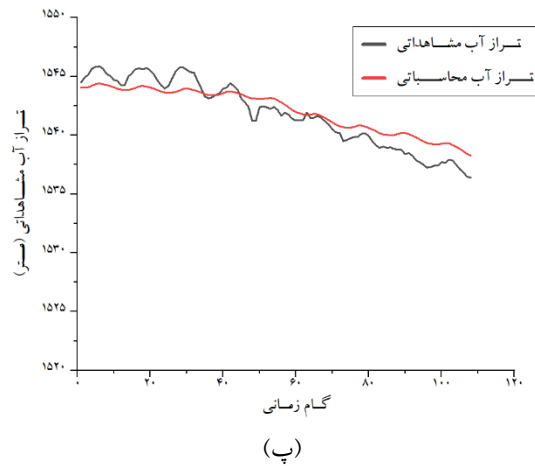
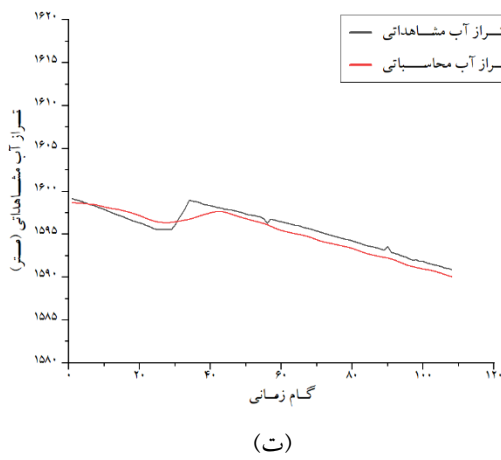
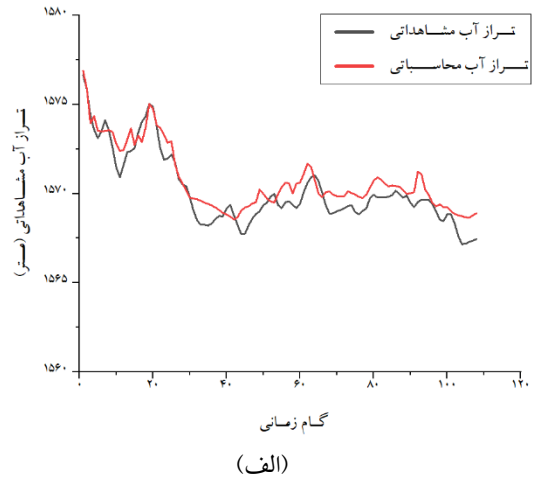
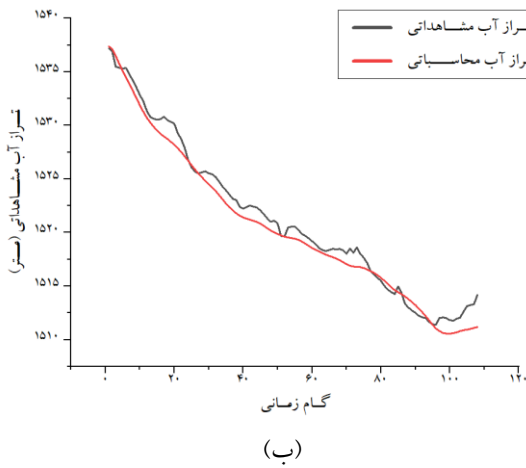


شکل ۵-۵ تراز آب زیرزمینی مشاهداتی و محاسباتی در تمام چاه‌های مشاهداتی در شهریور ۱۳۹۸

میانگین تراز آب زیرزمینی مشاهداتی و محاسباتی در کل دوره شبیه‌سازی، ۱۰۸ گام زمانی، در کل گستره آبخوان اصفهان\_پر خوار مطابق با شکل ۵-۶ می‌باشد؛ بر اساس نمودار ترسیم‌شده، تراز مطلق آب زیرزمینی با دقت قابل قبولی نسبت به داده‌های مشاهداتی شبیه‌سازی شده است. از آنجاکه شبیه‌سازی آب زیرزمینی در یک مدل توزیعی مانند MODFLOW در موقعیت‌های مختلف و با دقت‌های متفاوتی انجام می‌شود، نیاز است تا وضعیت شبیه‌سازی چاه‌های مشاهداتی در موقعیت‌های مکانی مختلف نیز بررسی گردد. بدین ترتیب، در گستره آبخوان به‌طور نمونه تعداد چهار چاه مشاهداتی برای بررسی انتخاب شدند. به‌منظور پراکندگی مناسب چاه‌های انتخابی، از شرق حوضه چاه مشاهداتی بین حبیب‌آباد و کمشچه، از مرکز حوضه چاه مشاهداتی یاقوت‌آباد جدید، از شمال غربی حوضه چاه مشاهداتی قلعه دوقلو و از محدوده غربی حوضه چاه مشاهداتی یونارت تعیین شدند؛ تراز مشاهداتی و محاسباتی در کل دوره شبیه‌سازی برای چاه‌های منتخب در شکل ۵-۷ قابل مشاهده است. مطابق با نمودارهای ترسیم‌شده، دقت شبیه‌سازی برای چاه‌هایی که در نزدیکی جبهه‌های ورودی و خروجی قرار دارند بهتر است؛ درحالی‌که چاه‌های واقع در مرکز آبخوان به دلایلی چون وجود تصفیه‌خانه‌ها و زمین‌هائی که از شبکه نوین آبیاری تأمین می‌شوند و همچنین وجود تغییرات در مقادیر آب برگشتی و نفوذ سطحی به آبخوان، دقت کمتری را نشان می‌دهند.

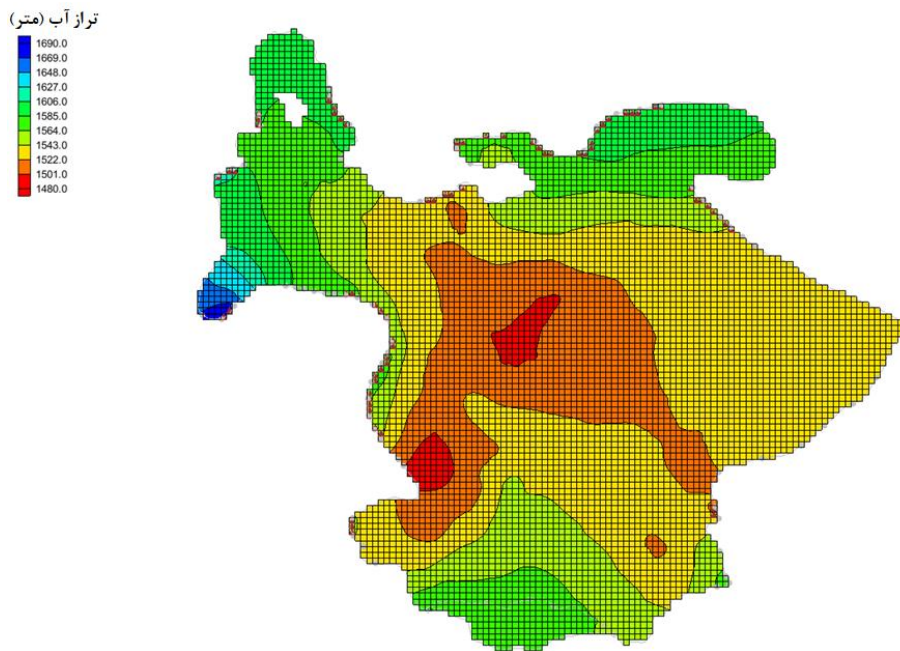


شکل ۵-۶ متوسط تراز آب زیرزمینی در گستره آبخوان اصفهان-برخوار

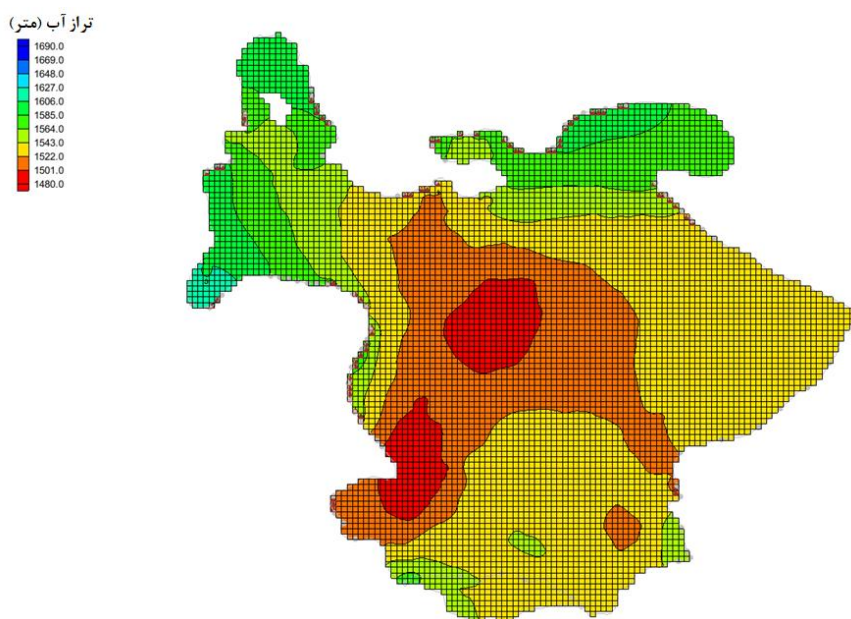


شکل ۵-۷ تراز آب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در کل دوره مدل‌سازی در چاه‌های مشاهداتی: الف) قلعه دوقلو؛ ب) بین حبیب آباد و کمشچه؛ پ) یونارت و ت) یاقوت آباد جدید.

شکل‌های ۵-۸ و ۵-۹ تراز آب زیرزمینی شبیه‌سازی شده توسط مدل نهائی در گستره آبخوان در موقعیت‌های مکانی مختلف برای دو گام زمانی مجزا شامل گام زمانی شروع مدل‌سازی در مهرماه ۱۳۸۹ و آخرین گام مدل‌سازی یعنی شهریور ۱۳۹۸ را نمایش می‌دهند. نتایج بیانگر آن است که سطح آب زیرزمینی در طول دوره مدل‌سازی افت محسوسی را تجربه کرده و به‌طور کلی، سطح کلی تراز آب زیرزمینی در همه مناطق افت داشته است؛ اما مناطق مرکزی و شرقی به دلیل بالا بودن حجم برداشت‌ها از منابع آب زیرزمینی، سطح آب در ارتفاع پایین‌تری قرار گرفته است.



شکل ۵-۸ تراز آب زیرزمینی شبیه‌سازی شده در مهر ۱۳۸۹



شکل ۵-۹ تراز آب زیرزمینی شبیه‌سازی شده در شهریور ۱۳۹۸

### ۵-۳- نتایج صحت‌سنجی چارچوب اجتماعی-هیدرولوژیکی پیشنهادی

باتوجه به تصادفی بودن تعدادی از متغیرها و نبود معیاری مشخص برای صحت‌سنجی یک چارچوب رفتاری، در بیشتر مواقع کالیبراسیون مدل‌های عامل‌بنیان چالش‌برانگیز است. در راستای رفع این مشکل، با ایجاد ارتباط بین مدل آب زیرزمینی و مدل عامل‌بنیان سعی بر آن است تا با مقایسه تراز آب شبیه‌سازی شده در مدل اجتماعی-هیدرولوژیکی با تراز آب شبیه‌سازی شده در مدل هیدرولوژیکی در حالت بدون اتصال به مدل اجتماعی، صحت نتایج مدل ارزیابی گردد. دستیابی به این مهم با استفاده از یک مدل بهینه‌سازی در تعیین ضرایب اجتماعی و آب برگشتی محقق می‌شود. با توسعه مدل شبیه‌ساز آب زیرزمینی و کالیبره کردن پارامترهای آبخوان، مدل شبیه‌ساز رفتاری مطابق با اصول بیان شده در فصل سوم توسعه پیدا کرد. محاسبه ضرایب اجتماعی در دوره چهارساله تصمیم‌گیری، و میزان آب برگشتی در دوره پنج‌ساله حافظه تاریخی کشاورزان، با استفاده از الگوریتم ژنتیک و با هدف کمینه‌کردن اختلاف تراز آب مشاهداتی و محاسباتی در طول ۱۰۸ گام زمانی صورت گرفت.

نحوه عملکرد مدل بهینه‌سازی توسعه یافته بدین صورت است که ابتدا مقادیر تخلیه از چاه‌ها در دوره تاریخی بر اساس ضریب آب برگشتی محاسبه می‌شود. سپس با شروع دوره تصمیم‌گیری، با مشخص شدن متغیرهای تصمیم به صورت تصادفی، گروه‌بندی رفتاری کشاورزان بر پایه ضرایب اجتماعی توسعه یافته انجام شده و هر کشاورز با در نظر گرفتن نوع رفتار خود محصولی را انتخاب می‌کند. پس از آن، میزان آب برداشتی از هر چاه بر مبنای نوع محصول انتخابی مشخص شده و در این مرحله اجرای مدل اجتماعی به اتمام می‌رسد. در نهایت، تراز آب زیرزمینی در مدل هیدرولوژیکی بر اساس مقادیر تخلیه محاسباتی شبیه‌سازی می‌گردد و مقدار تابع هدف بر اساس معیار خطای RMSE مطابق با رابطه (۳-۲۳) و باتوجه به اطلاعات تراز آب زیرزمینی تعیین می‌گردد.

الگوریتم ژنتیک پیشنهادی در این مطالعه در محیط نرم‌افزار Python اجرا شده است؛ همچنین، نحوه اتصال و اجرای زیرمدل‌های هیدرولوژیکی و اجتماعی با استفاده از کتابخانه‌های موجود به تفصیل در بخش ۳-۶ شرح داده شده است. پارامترهای اولیه تعریف شده در الگوریتم پیشنهادی شامل: اندازه جمعیت، تعداد نسل‌ها، احتمال اجرای عملگر تزویج و احتمال جهش است. مقادیر این پارامترها بر اساس مقادیر استاندارد [۱۳۲] و نیز با انجام سعی و خطا بر مبنای روند بهبود تابع هدف در الگوریتم مشخص شد. بدین سبب، در این مطالعه، تعداد جمعیت اولیه برابر با ۵۰، تعداد نسل‌ها برابر با ۲۰، احتمال تزویج برابر با ۰/۷ و احتمال عملگر جهش برابر با ۰/۰۱ فرض شده است. به منظور بررسی صحت مقادیر بهینه، اجرای الگوریتم ۵ مرتبه تکرار شد که مجموعاً ۵۰۰۰ بار اجرای مدل را نتیجه داد. زمان اجرای مدل برای هر مجموعه پاسخ در الگوریتم، به طور تقریبی ۳۲۰ ثانیه به طول انجامید. نتایج مقادیر نهائی متغیرهای تصمیم در الگوریتم ژنتیک مطابق با جدول ۴-۵ گزارش شده است.



**جدول ۵-۴** مقادیر بهینه و محدوده متغیرهای تصمیم در الگوریتم ژنتیک پیشنهادی

متغیر تصمیم	مقدار حداقل متغیر	مقدار حداکثر متغیر	خروجی الگوریتم ژنتیک
$W_1$	۰	۱	۰/۱۵
$W_2$	۰	۱	۰/۷
R	۰	۱	۰/۱۶

نتایج حاکی از آن است که **ضرایب معادله ساختاری** برای متغیرهای روان‌شناختی نظیر نگرش، هنجارذهنی و کنترل رفتاری درک‌شده، به ترتیب برابر با ۰/۱۵، ۰/۷۰ و ۰/۱۵ است. بر این اساس، پارامتر هنجارذهنی بیشترین نقش را در فرآیند تصمیم‌گیری کشاورزان و شکل‌دهی رفتار آن‌ها ایفا می‌کند؛ در نتیجه، مؤلفه‌های سازنده هنجارذهنی اعم از وضعیت آب زیرزمینی، درک اهمیت پدیده فرونشست و سطح تحصیلات کشاورز، پیوستگی قوی‌تری با تمایل کشاورز به صرفه‌جویی در مصرف آب کشاورزی دارد. این امر کاملاً با واقعیت تطابق دارد؛ چراکه در شرایط واقعی کشاورز بر اساس میزان آب در دسترس خود و پراپی یا کم‌آبی که در چاه بهره‌برداری مشاهده می‌کند در راستای انتخاب الگوی کشت تصمیم می‌گیرد. همانطور که در اسناد اجتماعی نیز به آن اشاره می‌شود، نمی‌توان یک کشاورز زراعی را یافت که آب در اختیار داشته باشد و از آن در راستای کشت محصولات خود بهره‌برداری نکند. میزان تأثیر دو پارامتر دیگر یعنی نگرش و کنترل رفتاری درک‌شده کشاورز، بر تمایل کشاورز به صرفه‌جویی کمتر است و به یک اندازه بر شکل‌دهی تمایل کشاورز تأثیر گذار هستند.

ضریب آب برگشتی برای مصارف کشاورزی برابر با ۰/۱۶ تخمین زده می‌شود؛ این در حالی است که بر اساس گزارش بیلان محدوده اصفهان برخوار در سال آبی ۱۳۹۰-۱۳۸۹ مقدار این پارامتر برابر با ۰/۴۰ گزارش شده است. دلیل این تفاوت را می‌توان در این نکته یافت که در طول دوره مدل‌سازی تعدادی از چاه‌های بهره‌برداری به سیستم‌های نوین آبیاری مجهز شده‌اند که تا حدی کاهش میزان آب برگشتی به آبخوان را در پی دارد. از طرفی، میزان تخلیه چاه‌ها مطابق با میزان نیاز آبی گیاه برآورد شده که مقدار آن برای برخی از ماه‌ها صفر لحاظ می‌گردد، درحالی که در این دوران نیز کشاورز برداشت انجام می‌دهد. جبران این مقدار کسری در برداشت از طریق کاهش میزان آب برگشتی در مدل اعمال شده است. نتایج حاصل از کالیبراسیون تراز آب زیرزمینی در مدل متصل شده، در بخش بعد توضیح داده می‌شود.

### ۵-۳-۱- کالیبراسیون سطح آب زیرزمینی

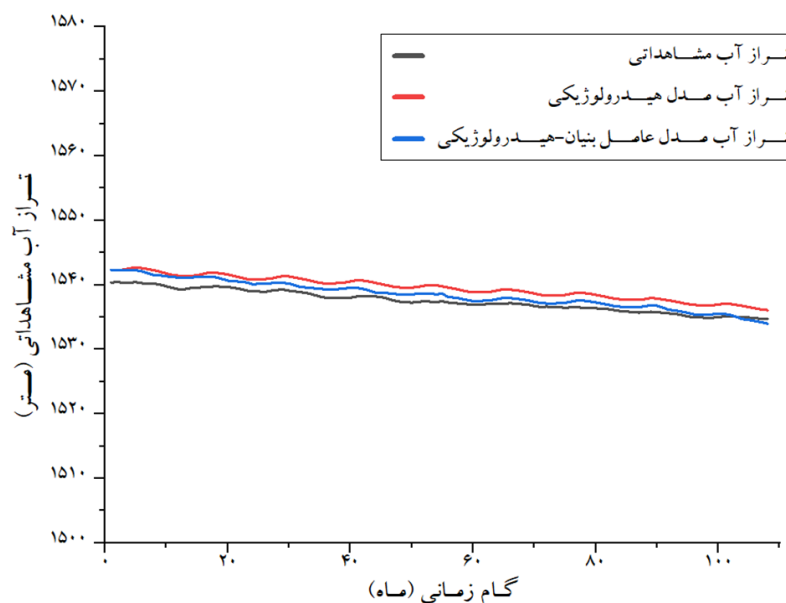
در این مطالعه هدف از توسعه مدل بهینه‌ساز، یافتن مقادیر متغیرهای تصمیم با کاهش تفاوت تراز آب مشاهداتی و محاسباتی بوده است. ارزیابی اعتبار مدل اجتماعی-هیدرولوژیکی توسعه‌یافته با محاسبه معیار خطای ریشه میانگین مربعات خطا در ۲۵ چاه مشاهداتی در محدوده آبخوان اصفهان-برخوار انجام گرفت. جدول ۵-۵، نتیجه خطای

محاسبه شده بر اساس نتایج مدل بهینه ساز را نشان می دهد. باتوجه به این نتایج، خطای مدل جفت شده اجتماعی-هیدرولوژیکی در حالت بهینه برابر با ۴/۲۴۲۴ متر در کل دوره نه ساله است.

**جدول ۵-۵** خطای چارچوب اجتماعی-هیدرولوژیکی پیشنهادی

دوره شبیه سازی	گام زمانی مدل سازی	RMSE
حافظه تاریخی	مهرماه ۱۳۸۹ تا شهریور ۱۳۹۵	۴/۴۱
دوره تصمیم گیری	مهر ۱۳۹۵ تا شهریور ۱۳۹۸	۳/۷۸
کل دوره شبیه سازی	مهر ۱۳۸۹ تا شهریور ۱۳۹۸	۴/۲۴

در شکل ۵-۱۰، میانگین تراز آب زیرزمینی محاسباتی در دو حالت مدل عامل بنیان-هیدرولوژیکی و مدل هیدرولوژیکی در گستره آبخوان با میانگین تراز آب مشاهداتی مقایسه شده است. روند نمودارها نشان می دهد که تراز آب زیرزمینی در شروع نمودار مطابق با شرایط اولیه مدل هیدرولوژیکی در حالت ماندگار است و اختلاف بین تراز مشاهداتی و محاسباتی با اجرای مدل بهینه سازی در طول گام های زمانی کاهش می یابد. در آخر، تفاوت میان میانگین تراز آب در کل آبخوان در حالت محاسباتی در مقایسه با مقادیر مشاهداتی دقت قابل قبولی را نشان می دهد.

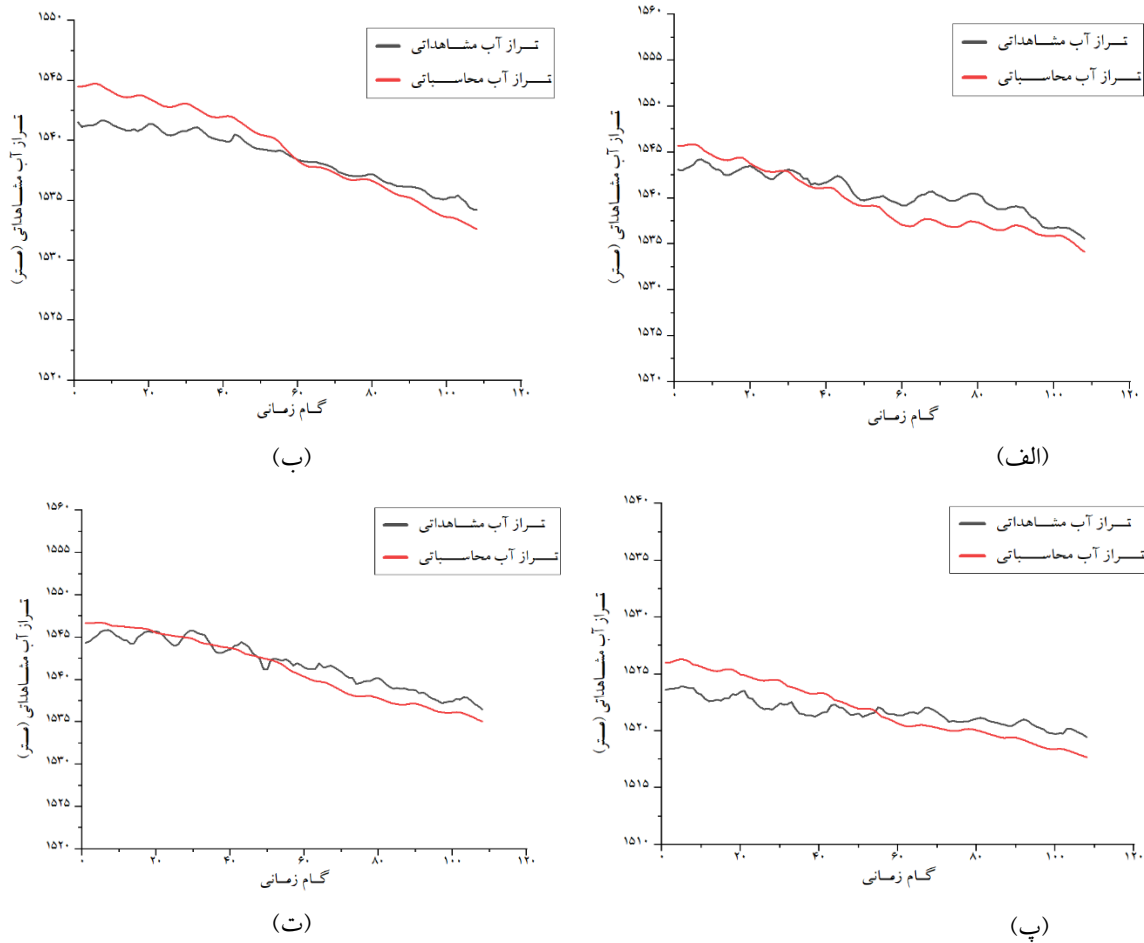


**شکل ۵-۱۰** میانگین تراز آب مشاهداتی و محاسباتی در مدل هیدرولوژیکی و اجتماعی-هیدرولوژیکی در گستره آبخوان

علاوه بر این، از آنجاکه در این پژوهش شبیه سازی تراز آب زیرزمینی به صورت توزیعی صورت می گیرد، نتایج تراز آب زیرزمینی محاسبه شده را می توان در برخی از چاه های مشاهداتی در گستره آبخوان ارزیابی کرد. تراز آب زیرزمینی شبیه سازی شده در تعدادی از چاه های مشاهداتی شامل: چاه مشاهداتی پل سرهنگ، چاه مشاهداتی تقاطع



اتوبان خورزوق، چاه مشاهداتی سهراه سهل آباد و چاه مشاهداتی یونارت باتوجه به شکل ۵-۱۱ مورد بررسی قرار می گیرد.



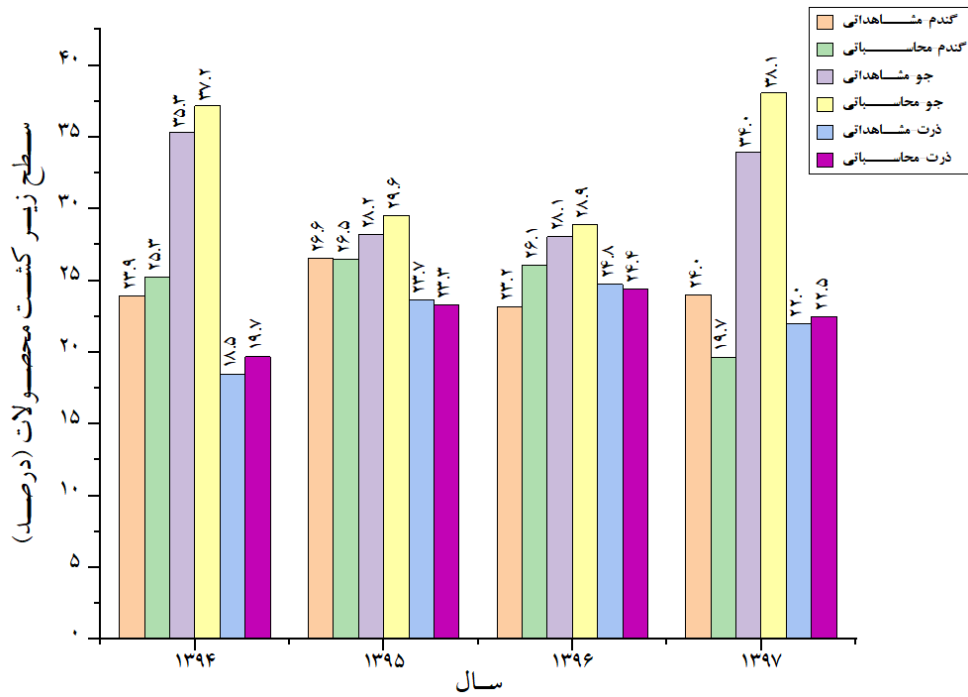
شکل ۵-۱۱ تراز آب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در کل دوره مدل‌سازی در چاه‌های مشاهداتی: الف) پل سرهنگ؛ ب)

تقاطع اتوبان خورزوق؛ پ) سهراهی سهل آباد و ت) یونارت

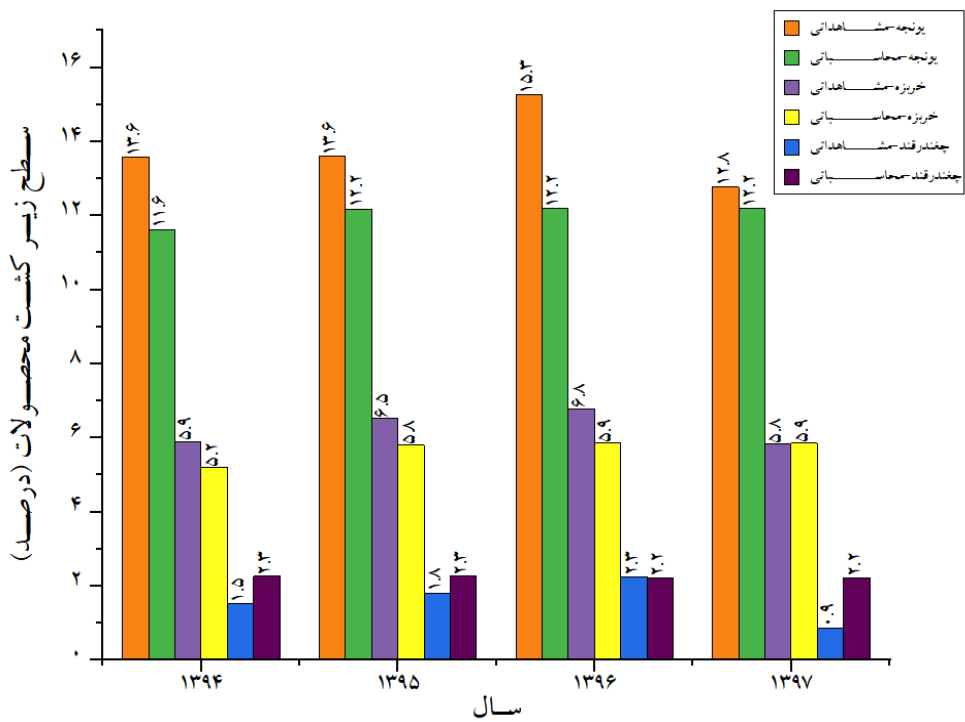
### ۵-۳-۲- صحت‌سنجی سطح زیر کشت

مدل عامل‌بنیان\_آب زیرزمینی<sup>۱</sup> توسعه یافته به منظور شبیه‌سازی انتخاب الگوی کشت کشاورزان، به کار گرفته شده است؛ بنابراین نیاز است تا صحت نتایج تولیدی برای سطح زیر کشت هریک از محصولات منتخب شامل: گندم، جو، ذرت علوفه‌ای، یونجه، چغندر قند و خربزه بررسی شود. لازم به ذکر است که اطلاعات موجود از سطح زیر کشت محصولات در محدوده شهرستان‌های واقع در استان اصفهان بوده، در حالی که مدل در محدوده آبخوان توسعه پیدا کرده است. به همین دلیل، به منظور مقایسه نتایج شبیه‌سازی شده و مشاهداتی، سطح زیر کشت هر محصول نسبت به سطح زیر کشت کل شش محصول منتخب در شهرستان‌های محدوده آبخوان از جمله: اردستان، برخوار، شاهین شهر، نجف آباد و خمینی شهر سنجیده می‌شود. ضمن اینکه در طول دوره پنج‌ساله موسوم به حافظه تاریخی، سطح زیر کشت محصولات مطابق با اطلاعات تاریخی به مدل وارد شده و در فرآیند تصمیم‌گیری کشاورز دخیل نیست. بنابراین، مقایسه نتایج تنها برای دوره چهارساله از سال آبی ۱۳۹۵-۱۳۹۴ تا ۱۳۹۸-۱۳۹۷ صورت می‌گیرد که در این بازه کشاورز وارد فرآیند تصمیم‌گیری و انتخاب محصول می‌شود. شکل‌های ۵-۱۲ و ۵-۱۳ درصد سطح زیر کشت محاسباتی و مشاهداتی را برای دو دسته‌بندی مجزا نشان می‌دهند؛ دسته اول شامل محصولات گندم، جو و ذرت بوده و دسته دیگر یونجه، خربزه و چغندر را در بر می‌گیرد. کل مساحت زیر کشت برای دوره چهارساله مقداری ثابت داشته و برابر با ۲۰۸۷۵ منظور گردیده است؛ چرا که فرآیند کاهش سطح تحت کشت در اثر نکاشت در نظر گرفته نشده است. نتایج حاکی از آن است که دقت مدل در شبیه‌سازی روند تغییرات سطح کشت در محدوده آبخوان اصفهان\_برخوار قابل قبول است.

<sup>۱</sup> Agent-Based\_Groundwater modelling (ABM-GW)



شکل ۵-۱۲ سطح زیر کشت محاسباتی و مشاهداتی سه محصول گندم، جو و ذرت



شکل ۵-۱۳ سطح زیر کشت محاسباتی و مشاهداتی سه محصول یونجه، خریزه و چغندر قند

### ۵-۴- نتایج مدل سازی اجتماعی در مدل عامل بنیان

با اجرای مدل اجتماعی، میزان تمایل کشاورزان به صرفه جویی در مصرف آب کشاورزی بر اساس مقدار کمی مؤلفه‌های مؤثر مشخص می‌شود. در مطالعه پیش‌رو، کشاورزان به چهار گروه اصلی شامل کشاورزان فعال، تعاملی، نیمه‌ادراکی و ادراکی و نیز یک گروه فرعی شامل کشاورزان متخلف تقسیم‌بندی می‌شوند. از آنجا که پارامترهای تأثیرگذار در محاسبه میزان تمایل به صرفه جویی در کشاورزان در دو حالت پویا (متغیر در طول زمان) و ایستا (ثابت در طول زمان) تعریف شده‌اند، تعداد عوامل کشاورز از هر گروه رفتاری، در هر گام زمانی متغیر خواهد بود؛ ضمن اینکه، در هر گام زمانی ابتدا کشاورزان در چهار گروه دسته‌بندی می‌گردند. پس از آن، کشاورزانی که بعد از برآوردهای احتمالی از میزان سود سال آینده احتمال می‌دهند که با تغییر الگوی کشت متضرر خواهند شد، به عوامل متخلف تبدیل می‌شوند. جدول ۵-۶ تعداد کشاورزان در هر گروه رفتاری، در دو حالت پیش و پس از تصمیم‌گیری در دوره چهارساله نمایش می‌دهد. نتایج حاکی از آن است که درصد بالایی از کشاورزان، کشاورزان فعال هستند که معیار سود اقتصادی را مبنای تصمیم‌گیری‌های خود قرار می‌دهند. در مقابل، هیچ کشاورزی از نوع ادراکی در محدوده اصفهان-برخوار شناسایی نشده است. نتایج منعکس‌کننده نزدیکی شرایط واقعی محدوده مطالعاتی و نتایج مدل است که مطابق با گزاره‌های اجتماعی استفاده‌شده در این پژوهش هستند و تأییدی بر فرضیات اعمال‌شده در توسعه مدل است.

مطابق با عبارت «هیچ عامل کشاورزی از نوع زراعی وجود ندارد که در چاه خود آب داشته باشد و از آن برای انجام کشاورزی بهره‌برداری نکند.» می‌توان این‌گونه تفسیر کرد که کشاورز از آب موجود تا زمانی استفاده می‌کند که دیگر آبی در چاه مشاهده نکند؛ این امر، بی‌توجهی به معیار صرفه جویی در آب کشاورزی را آشکار می‌سازد. این شرایط در تضاد کامل با رفتار کشاورزان ادراکی بوده که در مدل تعداد آن‌ها برابر با صفر مشخص شده است. از طرفی، سودجویی کشاورزان و اولویت معیار سود اقتصادی در انتخاب الگوی کشت از مطالعات موجود قابل استناد است. همانطور که گزاره «سطح درآمد پائین، موجب انعطاف‌پذیری پائین عوامل در اجرای دستورالعمل‌های ابلاغی می‌شود» آشکار می‌سازد، اولویت کشاورزان در اجرای فعالیت‌های کشاورزی، دستیابی به سود بیشتر است تا از این طریق معیشت خود را تأمین کنند؛ همین امر گواهی بر اولویت بالای معیار اقتصادی برای عوامل کشاورزی دارد که نتیجه به‌دست آمده از چارچوب پیشنهادی را تصدیق می‌نماید.

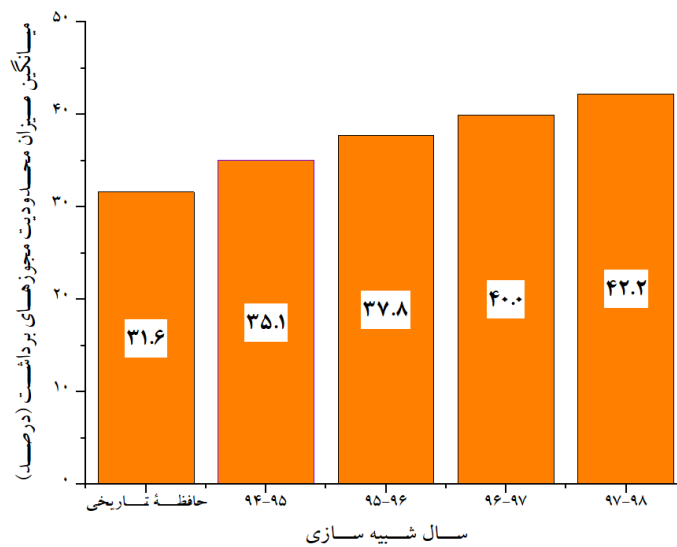
جدول ۵-۶ تعداد عوامل کشاورز از هر گروه رفتاری در طول دوره تصمیم‌گیری

نوع رفتار	سال							
	۱۳۹۷-۹۸		۱۳۹۶-۹۷		۱۳۹۵-۹۶		۱۳۹۴-۹۵	
	قبل	بعد	قبل	بعد	قبل	بعد	قبل	بعد
	تصمیم‌گیری	تصمیم‌گیری	تصمیم‌گیری	تصمیم‌گیری	تصمیم‌گیری	تصمیم‌گیری	تصمیم‌گیری	تصمیم‌گیری
تعاملی	۵۷	۵۷	۴۶	۴۶	۲۰	۲۰	۷	۱۹
فعال	۱۴۱۳	۱۴۱۳	۱۳۸۸	۱۳۹۲	۱۳۷۶	۱۴۰۰	۱۱۸۵	۱۳۴۰
ادراکی	.	.	.	.	.	.	.	.
نیمه ادراکی	۲۵۴	۲۵۴	۲۸۶	۲۸۶	۳۰۰	۳۰۴	۳۶۱	۳۶۵
متخلف	.	.	۴	.	۲۸	.	۱۷۱	.

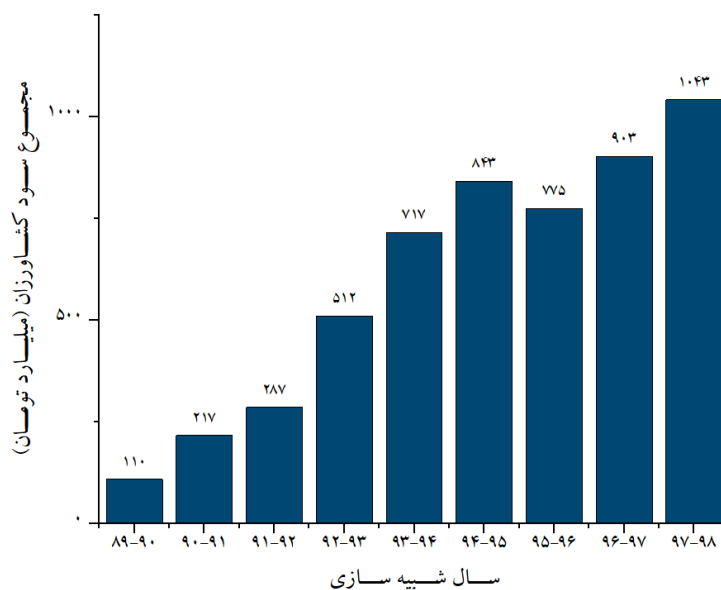
معیارهای مؤثری همچون وضعیت آب زیرزمینی که منجر به محدودیت سالانه کشاورزان در تصمیم‌گیری برای برداشت آب زیرزمینی می‌شوند و نیز مجموع سود سالانه عوامل کشاورز در این مطالعه، در طول زمان متغیر هستند. سطح آب زیرزمینی شبیه‌سازی شده در وضعیت کنونی در بخش صحت‌سنجی مدل پیش‌تر بررسی شد که سطح افت آبخوان را به‌طور ماهانه شبیه‌سازی می‌کند. از آنجا که در مدل آب زیرزمینی افت تراز آب در محدوده اصفهان-پرخوار در هر سال متغیر است، میزان محدودیت تصمیم‌گیری نیز بر همین اساس برای عوامل کشاورز در سال‌های متوالی متفاوت در نظر گرفته می‌شود. شکل ۱۴-۵ میانگین میزان محدودیت مجوزها برای کشاورزان را مشخص می‌کند؛ به‌طور مشخص، میانگین محدودیت مجوزها در هر سال با توجه به افت سطح آبخوان و تراز آب در هر چاه روند افزایشی را نشان می‌دهد. اولین سال پس از دوره حافظه تاریخی سال آبی ۱۳۹۴-۹۵ است که کشاورزان پس از یک دوره پنج‌ساله آزادی اختیار در برداشت، وارد اولین دوره تصمیم‌گیری می‌شوند؛ سال یادشده، بیشترین نرخ افزایش محدودیت که برابر با ۳/۴۲ درصد محاسبه شده است را تجربه می‌کند. در سال‌های متوالی بعدی با افت آب زیرزمینی، میانگین میزان محدودیت آب در دسترس بین ۲/۲ تا ۲/۷ درصد افزایش می‌یابد.

تغییرات سود حاصل از کشاورزی که دیگر معیار پویا در مدل‌سازی محسوب می‌شود، در طول دوره نه‌ساله شبیه‌سازی مطابق با شکل ۱۵-۵ است. به‌شکلی واضح، هر سال مجموع سود همه کشاورزان افزایش می‌یابد. چراکه قیمت فروش محصولات هر ساله روندی افزایشی را طی می‌کند؛ باین وجود در مقایسه دقیق‌تر، می‌توان این نکته را دریافت که درصد افزایش درآمد کشاورزان در سال‌های متوالی یکسان نیست. مطابق با نمودار، در طول دوره حافظه تاریخی، کشاورزان افزایش سود بیشتری را تجربه می‌کنند، به‌دلیل آنکه هیچ‌گونه محدودیتی در تصمیم‌گیری و برداشت از آب زیرزمینی بر آن‌ها اعمال نشده و عملکرد محصولات کشت شده به مراتب کمتر از سال‌های تصمیم‌گیری

کاهش یافته است. این در حالی است که در طول دوره تصمیم‌گیری، با اعمال محدودیت توسط عامل نظارتی، عملکرد محصولات کشت شده به دلیل تنش آبی کاهش می‌یابد. همین امر موجب می‌شود که با وجود افزایش قیمت محصولات، سود کشاورزان با نرخ کندتری افزایش یابد؛ به طوری که حتی در سال آبی ۹۶-۱۳۹۵ به دلیل افزایش بیشتر هزینه‌های کشاورزی (حدود ۹٪) نسبت به افزایش قیمت محصولات (حدود ۲٪)، سود کشاورز نسبت به سال پیشین کاهش می‌یابد. به بیانی دیگر، سود کشاورز در دوره حافظه تاریخی به میزان ۳۰ تا ۸۰ درصد افزایش داشته در حالی که در دوره تصمیم‌گیری افزایش سود سالانه بین ۱۵ تا ۱۷ درصد بوده و در سال ۹۶-۱۳۹۵ نیز ۸ درصد کاهش را تجربه کرده است.

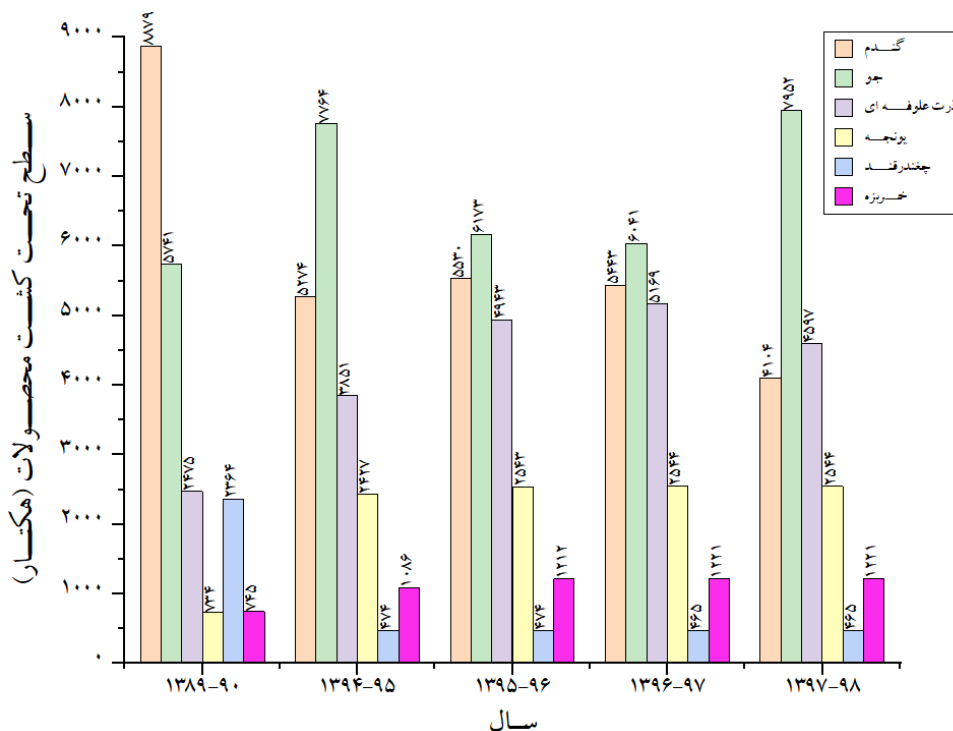


شکل ۵- ۱۴ میانگین محدودیت تصمیم‌گیری سالانه کشاورزان در برداشت آب زیرزمینی



شکل ۵- ۱۵ مجموع سود عوامل کشاورز در کل دوره شیبه‌سازی

در نهایت، سطح زیر کشت شبیه‌سازی شده در سال‌های آبی ۹۵-۱۳۹۴ تا ۹۸-۱۳۹۷ مطابق با شکل ۵-۱۶ است. بر این اساس سطح زیر کشت برای محصولات مختلف نوساناتی را نشان می‌دهد، اما به‌طور کلی روند تغییر سطح زیر کشت محصول ذرت در طول دوره تصمیم‌گیری صعودی بوده است. از آنجا که عملکرد محصول ذرت از سایر محصولات پیشنهادی کم‌آب‌بر بیشتر بوده، سطح زیر کشت آن افزایش بیشتری نسبت به سایر محصولات کشاورزی تجربه کرده است. در رابطه با دو محصول پیشنهادی دیگر یعنی گندم و جو، سطح زیر کشت جو و گندم نسبت به دوره تاریخی به ترتیب افزایش و کاهش را تجربه کرده است. میزان نیاز خالص آبی و عملکرد گیاه برای دو محصول یادشده تقریباً مشابه است. بنابراین دلیل افزایش سطح زیر کشت جو در مقابل گندم را می‌توان به حساسیت کمتر جو به کم‌آبیاری نسبت داد. از آنجا که میزان آب در دسترس برای کشاورز در هر سال نسبت به سال گذشته با توجه به تراز آب زیرزمینی در چاه بهره‌برداری کاهش می‌یابد، محصول با عملکرد بهتر مانند ذرت و یا حساسیت کمتر به کم‌آبیاری نظیر جو افزایش سطح زیر کشت را نشان می‌دهند. در مقابل، سطح زیر کشت محصول پرآب‌بری مانند چغندر با وجود عملکرد بالای محصول به دلیل حساسیت بالا نسبت به کم‌آبیاری، کاهش چشمگیری را نسبت به دوره حافظه تاریخی یعنی سال ۹۰-۱۳۸۹ نشان می‌دهد؛ با این حال، سطح زیر کشت دو محصول پرآب‌بر خربزه و یونجه نسبت به دوره تاریخی تقریباً ثابت بوده و یا اندکی افزایش پیدا کرده است. دلیل این افزایش را می‌توان در سود بالای این دو محصول جستجو کرد؛ در واقع با وجود کاهش عملکرد این دو محصول بر اثر تنش آبی، عملکرد بالا و قیمت فروش بیشتر خربزه و یونجه موجب افزایش محدود و ثابت سطح زیر کشت این دو محصول شده است.



شکل ۵-۱۶ سطح زیر کشت محصولات در دوره تصمیم‌گیری در مقایسه با دوره تاریخی

### ۵-۵- بررسی نتایج سناریوهای مدیریتی

با بررسی نتایج حاصل از شبیه‌سازی فرآیند انتخاب الگوی کشت توسط کشاورزان در چارچوب مدل پیشنهادی می‌توان اطمینان حاصل کرد که مدل توسعه‌یافته قادر است به‌خوبی معیارهای تصمیم‌گیری کشاورزان را شناسائی کند. در واقع، با وجود یک مدل شبیه‌ساز آب زیرزمینی که به‌شکل کامل با مدل اجتماعی مرتبط است، می‌توان تغییرات شرایط فیزیکی محیط و یا تغییرات تراز آب زیرزمینی و نحوه تأثیر آن بر تصمیم‌گیری کشاورزان را به‌خوبی ارزیابی کرد. این امر بیان‌گر این مهم است که مدل به‌صورت مناسبی می‌تواند مفهوم تکامل هماهنگ<sup>۱</sup> در مدل‌های اجتماعی-هیدرولوژیکی را منعکس کند. بدین ترتیب، با استفاده از مدل این امکان فراهم می‌گردد تا به بررسی سناریوهای پیشنهادی در راستای بهبود شرایط آبخوان اصفهان-برخوار پرداخته شود.

دوره شبیه‌سازی در این مطالعه سال‌های آبی ۹۰-۱۳۸۹ تا ۹۸-۱۳۹۷ را در بر می‌گیرد که به‌سبب وجود داده‌های تاریخی و امکان صحت‌سنجی مدل با داده‌های شرایط واقعی انتخاب شده است. همچنین، ارزیابی سناریوهای پیشنهادی به‌منظور مقایسه «آنچه در شرایط کنونی اتفاق افتاده است» با «آنچه امکان بهبود شرایط را فراهم می‌کند» صورت پذیرفته است. در واقع، در این پژوهش با بررسی شرایط محدوده مطالعاتی و قواعد تصمیم‌گیری عوامل، چهار سناریوی مدیریتی برای مطالعه بازخورد عوامل در برابر استراتژی‌های تعیین‌شده از جانب عامل نظارتی، تدوین شد. این سناریوها شامل (۱) سناریوی اجتماعی؛ (۲) سناریوی افزایش قیمت محصولات کم‌آب؛ (۳) سناریوی اعمال جریمه برای کشت محصولات پرآب؛ و (۴) سناریوی بازار آب می‌باشد. فرضیات حاکم بر هر سناریو و نتایج حاصل از اجرای مدل در ادامه به تفصیل شرح داده شده است.

#### ۵-۵-۱- سناریو اجتماعی

اتخاذ رفتار صرفه‌جویانه توسط عوامل کشاورز وابسته به مؤلفه‌های روان‌شناختی همچون نگرش، هنجار ذهنی و کنترل رفتاری درک شده است که هر یک توسط تعدادی پارامتر فردی مانند سن، سطح تحصیلات، وابستگی معیشت به کشاورزی و سایر موارد که پیش‌تر به تفصیل بررسی شد، کمی‌سازی شده است و به‌تبع میزان تمایل کشاورزان به صرفه‌جویی در وابستگی کامل با این عوامل فردی-اجتماعی شناسائی می‌شود. بدین ترتیب، در سناریوی اجتماعی تلاش شده تا نحوه تغییر نتایج شبیه‌سازی در اثر بهبود پارامترهای اجتماعی شناسائی گردد. در این سناریو فرض می‌شود که تعدادی از پارامترهای روان‌شناختی منتخب در شرایطی ایده‌آل قرار دارند. بنابراین، فرض بر آن است که از طریق برگزاری کلاس‌های آموزشی برای کشاورزان، تجربه آن‌ها در کشت محصولات کم‌آب‌بری که توسط عامل نظارتی پیشنهاد می‌شود، بهبود می‌یابد. بر همین اساس، مقدار پارامتر مرتبط با تجربه کشاورزی برابر با ۱ منظور می‌گردد. علاوه‌براین، در این سناریو فرض می‌شود که با بهبود سطح اعتماد مردم به مسئولان بالادستی، کشاورزان تمایل بیشتری

<sup>۱</sup> Co-Evolution



به اجرای قوانین خواهند داشت و از برداشت‌های غیرمجاز دوری می‌کنند؛ پس مقدار این پارامتر نیز در سناریوی اجتماعی بیشینه بوده و برابر با عدد ۱ در نظر گرفته می‌شود. در نهایت، به دلیل آنکه ضریب اثرگذاری پارامتر هنجار ذهنی برابر با ۰/۷ مشخص شده، بهبود مقدار عددی پارامتر سطح اهمیت و درک عواقب فرونشست می‌تواند تأثیر بسیاری در تغییر گروه رفتاری کشاورزان و تبدیل آن‌ها به کشاورزان ادراکی و نیمه‌ادراکی داشته باشد. بنابراین مقدار این پارامتر نیز بیشینه مقدار ممکن برابر با ۱ در نظر گرفته می‌شود. از آنجا که در دوره پنج‌ساله حافظه تاریخی داده‌ها بر پایه اطلاعات موجود به مدل وارد شده‌اند و کشاورز تصمیمی اتخاذ نمی‌کند، نتایج مدل تنها برای دوره تصمیم‌گیری تحلیل و مقایسه می‌شود.

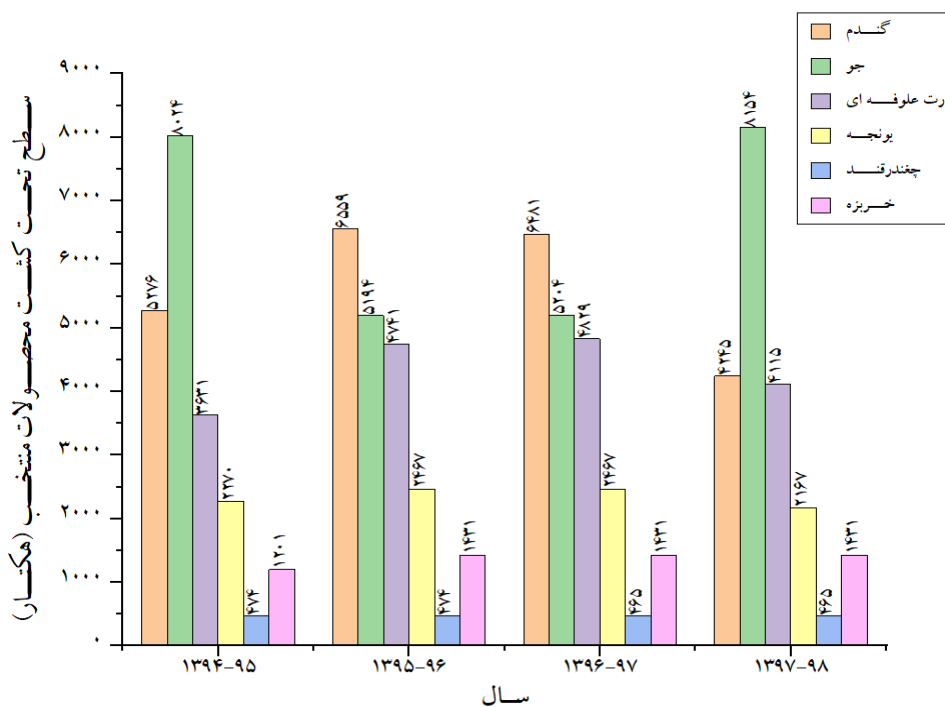
با اجرای سناریوی اجتماعی و بهبود پارامترهای منتخب، تعداد عوامل کشاورز در هر گروه رفتاری مطابق با نتایج نشان داده شده در جدول ۵-۷ تغییر می‌کند. مطابق با آنچه انتظار می‌رود، با بهبود پارامترهای اجتماعی، گروه‌های رفتاری کشاورزان نسبت به شرایط کنونی تغییر کرده است. در این سناریو، کشاورزان نیمه‌ادراکی بیشترین تعداد گروه رفتاری را خواهند داشت که در فرآیند تصمیم‌گیری، تعادلی بین معیار اقتصادی و صرفه‌جویی در مصرف آب کشاورزی برقرار می‌کنند. بر این اساس می‌توان ادعا کرد که حتی با در نظر گرفتن شرایط ایده‌آل برای وضعیت اجتماعی محدوده، پارامتر سود کشاورزی همواره نقش پررنگی در تصمیم‌گیری کشاورزان ایفا خواهد کرد. پس از کشاورزان نیمه‌ادراکی، کشاورزان ادراکی بیشترین تعداد گروه عوامل را به خود اختصاص می‌دهد که تنها به دنبال کمینه کردن مصرف آب کشاورزی هستند. مطابق با نتایج ارائه شده، تعداد این گروه کشاورزان به مرور زمان کاهش می‌یابد؛ درحالی که تعداد کشاورزان نیمه‌ادراکی و پس از آن کشاورزان فعال، در طول زمان افزایش می‌یابد. این امر بیانگر آن است که کشاورزانی که فقط معیار کاهش مصرف را در نظر می‌گیرند، با کاهش سطح درآمد کشاورزی و افت پارامتر سطح رفاه در گذر زمان، از لحاظ رفتاری به کشاورزانی با میزان تمایل کمتر به صرفه‌جویی تبدیل می‌شوند. در واقع، می‌توان ادعا کرد که در بهترین شرایط اجتماعی نیز وضعیت معیشت کشاورزان می‌تواند معیارهای کشاورزان در انتخاب الگوی کشت را تغییر دهد.

**جدول ۵-۷** تعداد عوامل کشاورز از هر گروه رفتاری در طول دوره تصمیم‌گیری در سناریوی اجتماعی

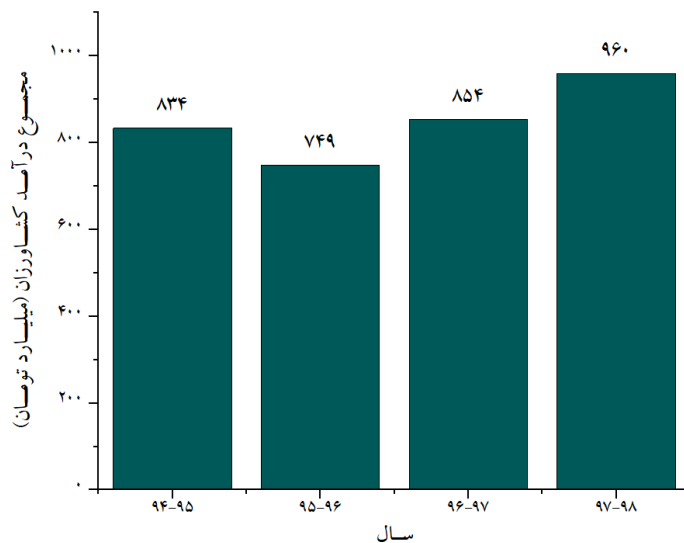
نوع رفتار	سال							
	۱۳۹۷-۹۸		۱۳۹۶-۹۷		۱۳۹۵-۹۶		۱۳۹۴-۹۵	
	قبل	بعد	قبل	بعد	قبل	بعد	قبل	بعد
تعاملی	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
فعال	۲۶	۲۶	۱۷	۱۷	۱	۱	۰	۰
ادراکی	۶۹	۶۹	۹۳	۹۳	۱۴۲	۱۴۲	۲۴۸	۲۵۱
نیمه ادراکی	۱۶۲۹	۱۶۲۹	۱۶۱۴	۱۶۱۴	۱۵۳۵	۱۵۸۱	۱۳۰۸	۱۴۷۳
متخلف	۰	۰	۰	۰	۴۶	۰	۱۶۸	۰

دگرگونی در گروه رفتاری کشاورزان، معیار تصمیم‌گیری آن‌ها را تحت‌الشعاع قرار می‌دهد و سطح زیر کشت

محصولات نیز به دنبال آن تغییراتی را تجربه می‌کند. شکل ۵-۱۷ تغییرات سطح زیر کشت محصولات را در سناریوی اجتماعی نشان می‌دهد. از آنجاکه در مجموع، میانگین تمایل کشاورزان به صرفه‌جویی در این سناریو بهبود یافته است، سطح زیر کشت محصولات کم‌آب‌بری چون گندم و جو نسبت به شرایط کنونی حوضه افزایش داشته است؛ چراکه بیشتر کشاورزان هر دو معیار اقتصادی و صرفه‌جویی را به شکل همزمان مد نظر قرار داده‌اند. بر اساس قیمت فروش محصولات و هزینه‌های کشاورزی، ابتدا در سال ۹۵-۱۳۹۴ سطح زیر کشت جو افزایشی در حدود ۸۰۰ هکتار را نشان می‌دهد و در سال ۹۶-۱۳۹۵، سطح کشت گندم به میزان ۱۰۰۰ هکتار افزایش داشته در حالی که میزان این سطح برای جو کاهش پیدا کرده است؛ همین روند برای سال سوم نیز تکرار شده است. در مقابل، سطح زیر کشت ذرت علوفه‌ای تغییر چندانی را نشان نمی‌دهد. در رابطه با سطح زیر کشت محصولات پرآب‌بری همچون یونجه می‌توان اذعان داشت که در سال‌های متمادی کاهشی بین ۲۰۰ تا ۴۰۰ هکتار را در میزان سطح کشت تجربه کرده است. سایر محصولات پرآب‌بر مانند چغندر و خربزه نیز تفاوت چندانی را نسبت به وضعیت کنونی نشان نمی‌دهند. سود حاصل از کشاورزی با تغییر سطح کشت محصولات، مطابق با شکل ۵-۱۸ تغییر می‌کند. با توجه به اینکه معیار کشاورزان ادراکی و نیمه‌ادراکی بهبود شرایط آب‌خوان و انتخاب محصولات کم‌آب‌بر است، مجموع سود کشاورزان در این سناریو نسبت به شرایط تاریخی کاهش یافته است؛ به طوری که نسبت به شرایط کنونی سود کشاورزان بین ۲ تا ۸ درصد کاهش یافته و این امر خود موجب افت تمایل کشاورزان به صرفه‌جویی در سال‌های آخر تصمیم‌گیری شده است.

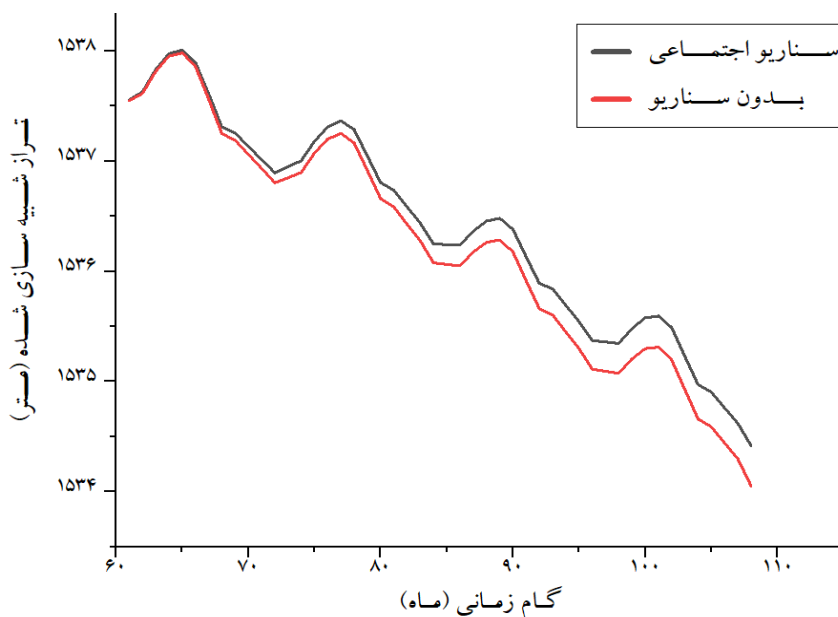


شکل ۵-۱۷ سطح کشت محصولات در دوره تصمیم‌گیری در سناریوی اجتماعی



شکل ۵-۱۸ مجموع سود عوامل کشاورز در سناریوی اجتماعی در دوره تصمیم گیری

در نهایت، تاثیر گذاری سناریو اجتماعی در بهبود شرایط آبخوان اصفهان-برخوار با بررسی میانگین تغییرات تراز آب زیرزمینی مطابق با شکل ۵-۱۹ ارزیابی شده است. مطابق با نتایج، به طور کلی تغییرات تراز آب زیرزمینی در بهترین حالت بهبود ۳۶ سانتی متری و به طور میانگین بهبود ۲۰ سانتی متری نسبت به وضعیت تاریخی را عیان می سازد. با بررسی تغییرات سطح کشت محصولات می توان این نکته را دریافت که کاهش سطح زیر کشت یک محصول کم آب بر با افزایش سطح کشت محصول پر آب بر دیگر جبران شده است که باعث شده میزان برداشت از آبخوان به میزان ۳ درصد کاهش یابد.



شکل ۵-۱۹ میانگین تراز آب وضعیت کنونی و سناریوی اجتماعی در گستره آبخوان

### ۵-۲- سناریو افزایش قیمت محصولات کم آب بر

همانطور که اشاره شد، دلیل انتخاب دو محصول پر آب بر خربزه و یونجه توسط کشاورزان حتی با وجود لزوم کم آبیاری، پرسود بودن آنها می باشد. بر همین اساس در سناریوی جاری فرض بر آن است که قیمت دو محصول گندم و جو به میزان ۱۰۰ درصد و قیمت ذرت علوفه‌ای به میزان ۵۰ درصد افزایش می یابد. در این سناریو بررسی می شود که با بهبود قیمت محصولات کم آبیاری همچون گندم، جو و ذرت، نحوه تصمیم گیری و انتخاب محصولات توسط کشاورزان چه تغییری پیدا می کند. برای ذرت افزایش قیمت کمتری در نظر گرفته شد، به دلیل آنکه عملکرد بالای این محصول، خود عامل جذب کشاورزان به انتخاب این گیاه برای کشت می باشد.

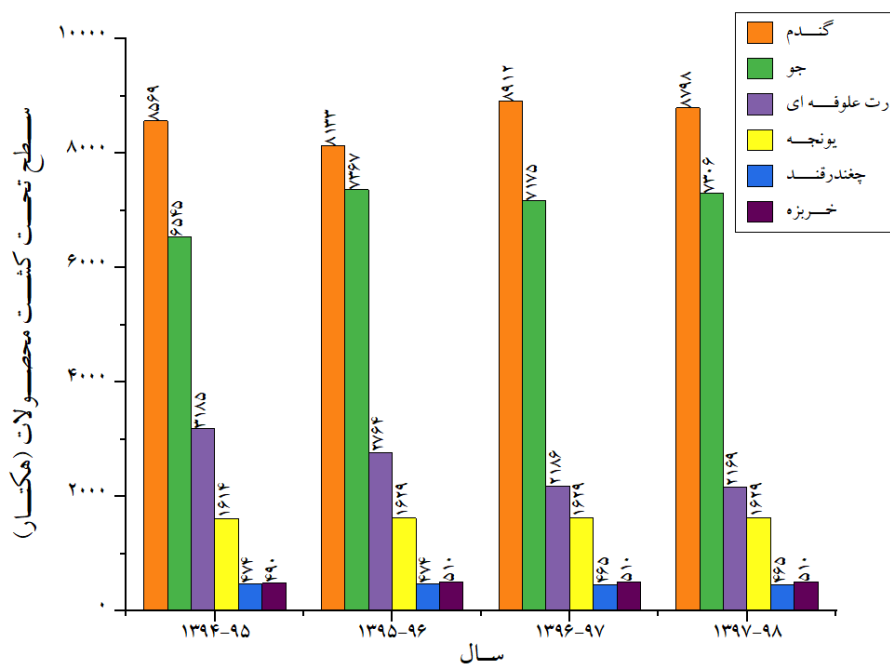
علاوه بر این، با افزایش قیمت دو محصول گندم و جو، سود تخمین زده شده توسط کشاورزان بیشتر خواهد بود که این امر کاهش تعداد کشاورزان متخلف را در پی دارد. در نهایت، با کمتر شدن تعداد کشاورزان متخلف تلاش می شود تا علاوه بر کاهش میزان اضافه برداشت از آبخوان، شرایط کنونی محدوده مطالعاتی بهبود پیدا کند. جدول ۵-۸ تغییرات تعداد کشاورزان هر گروه رفتاری را نشان می دهد. با افزایش قیمت محصولات کم آب بر، میزان سود تخمین زده شده توسط کشاورز افزایش می یابد که این امر سبب کاهش تعداد کشاورزان متخلف به صفر شده است. بدین ترتیب، بر مبنای قواعد تعریف شده در این پژوهش، کشاورزان متخلف به دنبال سود بیشتر، به کشت دو محصول خربزه و یونجه روی می آورند که کاهش در تعداد این گروه به تبع کاهش برداشت از چاه‌های بهره برداری و بهبود شرایط حال حاضر را به دنبال خواهد داشت.

جدول ۵-۸ تعداد عوامل کشاورز از هر گروه رفتاری در سناریوی افزایش قیمت محصولات کم آب بر

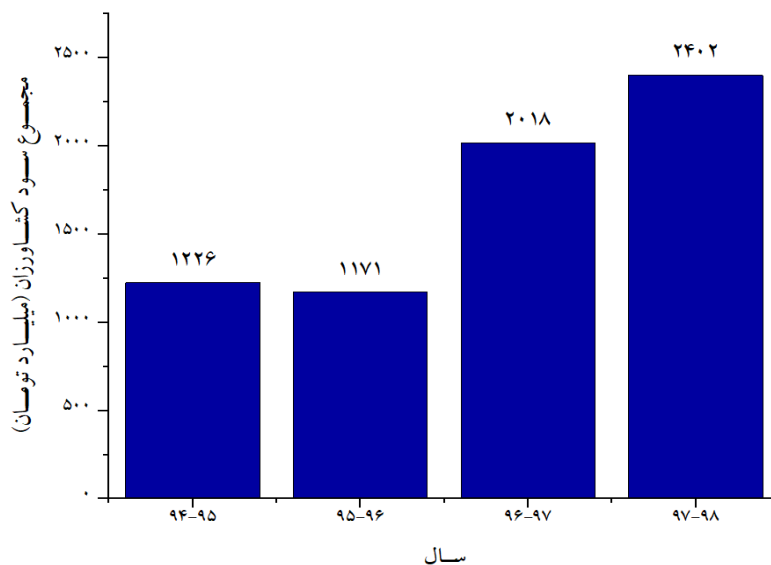
نوع رفتار	سال							
	۱۳۹۷-۹۸		۱۳۹۶-۹۷		۱۳۹۵-۹۶		۱۳۹۴-۹۵	
	قبل	بعد	قبل	بعد	قبل	بعد	قبل	بعد
	تصمیم گیری	تصمیم گیری	تصمیم گیری	تصمیم گیری	تصمیم گیری	تصمیم گیری	تصمیم گیری	تصمیم گیری
تعاملی	۲۰	۲۰	۳۲	۳۲	۱۴	۱۴	۲۰	۲۰
فعال	۱۳۳۶	۱۳۳۶	۱۳۹۶	۱۳۹۶	۱۳۷۳	۱۳۷۳	۱۳۳۶	۱۳۳۶
ادراکی	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
نیمه ادراکی	۳۶۸	۳۶۸	۲۹۶	۲۹۶	۳۳۷	۳۳۷	۳۶۸	۳۶۸
متخلف	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰

سطح زیر کشت محصولات در سناریوی تغییر قیمت محصولات کم آب بر مطابق با شکل ۵-۲۰ تغییر می کند. بر اساس نتایج، سطح زیر کشت محصول گندم افزایش چشمگیری را نشان می دهد؛ به طوری که تقریباً سطح زیر کشت گندم در هر سال نسبت به وضعیت کنونی بین ۳۰۰۰ تا ۴۰۰۰ هکتار افزایش سطح را تجربه کرده است. در مقابل، با

بهبود قیمت محصول گندم، دو محصول جو و ذرت به مقدار کمتری توسط کشاورز برای کشت انتخاب شده‌اند. علاوه بر این، سطح زیر کشت سه محصول پرآب بر نظیر یونجه، چغندر قند و ذرت علوفه‌ای کاهش داشته که خود سبب بهبود شرایط هیدرولوژیکی آبخوان می‌شود. تغییرات سود عوامل کشاورز در اثر افزایش قیمت محصولات در شکل ۵-۲۱ نشان داده شده است. نتایج حاکی از آن است که افزایش قیمت محصولات کشاورزی، تا حد زیادی موجب بهبود سود کشاورزان گردیده است. در واقع، سود کشاورزان در هر سال نسبت به وضعیت کنونی بین ۴۰ تا ۱۰۰ درصد افزایش را نشان می‌دهد.

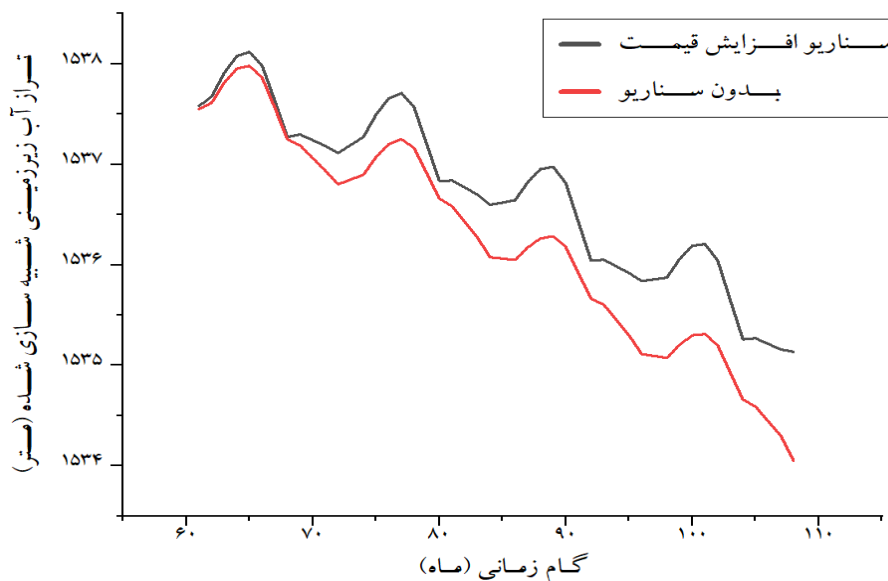


شکل ۵-۲۰ سطح کشت محصولات در دوره تصمیم‌گیری در سناریوی افزایش قیمت محصولات کم‌آب بر



شکل ۵-۲۱ مجموع سود عوامل کشاورز در سناریوی افزایش قیمت محصولات در دوره تصمیم‌گیری

عملکرد سناریوی افزایش قیمت با ارزیابی تغییرات تراز میانگین سطح آبخوان در مقایسه با شرایط تاریخی در آبخوان اصفهان\_برخوار صورت می‌گیرد؛ شکل ۵-۲۲ مقایسه نتایج حاصل از اجرای سناریو با شرایط کنونی را نشان می‌دهد. نتایج حاکی از آن است که در این سناریو برداشت از آبخوان در مجموع نسبت به شرایط تاریخی به میزان ۱۶ درصد کاهش یافته است. ضمن اینکه با توجه به افزایش سطح کشت محصول کم‌آب‌بری همچون گندم و کاهش سطح زیر کشت محصولات کم‌آب‌بر در مقایسه با شرایط بدون سناریو به‌طور میانگین در طول چهار سال تصمیم‌گیری به میزان ۴۷ سانتی‌متر بهبود پیدا کرده و در آخرین گام زمانی نیز سطح آب زیرزمینی به میزان ۱/۰۵ متر بهبود یافته است.



شکل ۵-۲۲ میانگین تراز آب وضعیت کنونی و سناریوی افزایش قیمت محصولات منتخب در گستره آبخوان

### ۵-۳-۵ سناریو اعمال جریمه برای کشت محصولات پرآب‌بر

سودآور بودن دو محصول خربزه و یونجه و کم‌سود بودن کشت دو محصول گندم و جو موجب می‌شود که کشاورزان دست به تخلف زده و یکی از دو محصول خربزه و یونجه را کشت کنند. بنابراین، اگر از سوددهی دو محصول کاسته شود، کشاورزان نیز ترجیح می‌دهند از میان محصولات پیشنهادی توسط **عامل نظارتی** یکی را انتخاب کنند. در سناریوی اعمال جریمه، فرض بر آن است که کشاورزانی که محصولات پرآب‌بری همچون چغندر، یونجه و خربزه را کشت می‌کنند، ملزم به پرداخت جریمه هستند. بدین ترتیب، میزان سود تخمین زده شده توسط کشاورز، با در نظر گرفتن هزینه اضافی به‌عنوان جریمه برای کشت محصول پرآب‌بر کاهش می‌یابد.

میزان جریمه اعمال شده در این سناریو بر اساس مقدار بهینه تابع جریمه در محدوده اصفهان\_برخوار بر اساس

مطالعه ذوالفقاری و احمدی (۱۴۰۰) مشخص شده است [۷۶]. بر این اساس، مقدار ضریب تابع جریمه برابر با ۳۰۰

میلیون تومان برهکتار اعمال می‌شود. این مقدار با بررسی وضعیت بهبود تراز آب زیرزمینی در مقایسه با وضعیت حال حاضر در چارچوب پیشنهادی مشخص شده است. جریمه اعمالی از سوی عامل نظارتی مطابق با میزان افت تراز آب زیرزمینی در چاهی که مورد بهره‌برداری کشاورز قرار می‌گیرد، اعمال می‌شود. رابطه (۵-۱) نحوه محاسبه جریمه مزارع با کشت محصول پرآب بر را مشخص می‌کند.

$$CO_{n,t} = \frac{\psi \Delta h_{n,t-1}^2 total - income_{n,t-1}}{\sum_{n=1}^N total - income_{t-1}} \quad (5-1)$$

در رابطه یادشده،  $CO_{n,t}$  مقدار هزینه جریمه برای کشاورز  $n$  ام در گام زمانی  $t$ ،  $\Delta h_n$  افت تراز آب زیرزمینی در چاه متعلق به کشاورز  $n$  ام در گام زمانی  $t-1$ ،  $total - income_{t-1}$  درآمد خالص کشاورز  $n$  ام از فروش محصولات زراعی در گام زمانی  $t-1$  و  $\sum_{n=1}^N total - income_{t-1}$  مجموع درآمد کشاورزان از فروش محصولات در گام زمانی  $t-1$  است؛ نحوه اجرای سناریوی اعمال جریمه و فرضیات حاکم بر آن مطابق با موارد زیر است:

۱) از آنجا که در ابتدای شروع دوره تصمیم‌گیری، هنوز میزان هزینه‌ها و سود حاصل از کشاورزی محاسبه نشده است، محاسبه هزینه جریمه بر اساس نسبت سود خالص کشاورز به مجموع سود کل کشاورزان در گام زمانی پیشین انجام می‌پذیرد.

۲) هزینه جریمه برای دو گروه از کشاورزان اعمال می‌گردد؛ گروه اول کشاورزانی هستند که در فرآیند تصمیم‌گیری به‌عنوان کشاورزان متخلف شناسائی می‌شوند و یکی از دو محصول یونجه و خربزه را برای کشت در سال پیش‌رو انتخاب می‌کنند و دسته دوم کشاورزانی هستند که وارد فرآیند تغییر الگوی کشت نشده‌اند و به‌دلیل پرسود بودن محصول، با وجود کم‌آبیاری یا کافی بودن میزان آب در دسترس برای کشت، الگوی کشت را تغییر نداده‌اند. از میان کشاورزان بدون تغییر الگوی کشت، کشاورزانی که سه محصول چغندر قند، یونجه و خربزه را کشت می‌کنند مشمول هزینه جریمه می‌شوند.

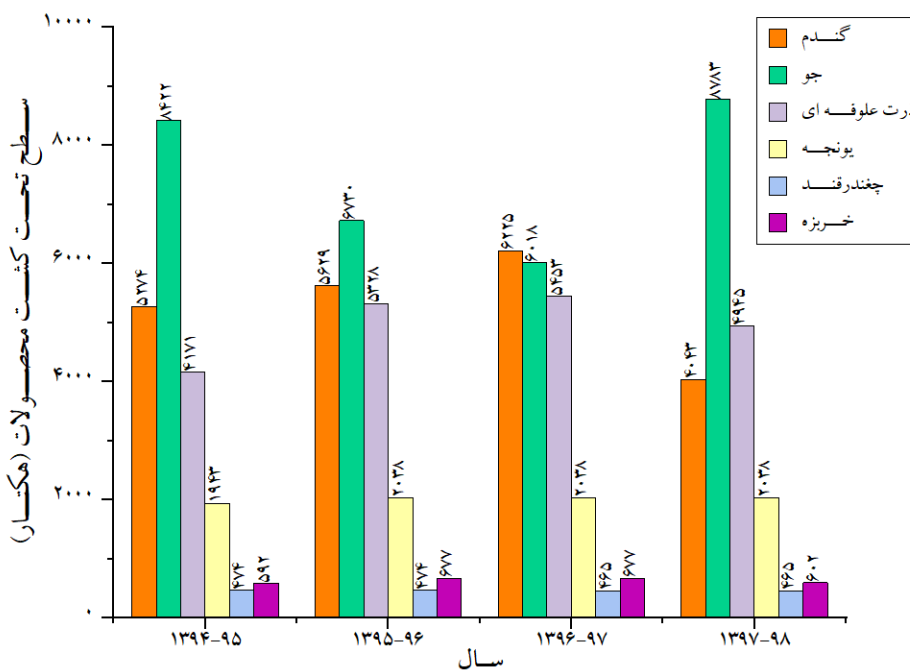
۳) همانطور که پیش‌تر نیز اشاره شد، کشاورز برای انتخاب محصول جدید و یا عدم تغییر الگوی کشت تخمینی از سود سال آینده برای خود محاسبه می‌کند که نحوه تخمین این مقادیر بر مبنای روابط ۳-۱۳ و ۳-۱۵ می‌باشد. پس از آن، هزینه جریمه علاوه بر هزینه‌های پمپاژ و کشاورزی، از سود حاصل از کشاورزی نیز کسر می‌شود. در صورتی که سود تخمینی منفی باشد و کشاورز با پرداخت جریمه کشت محصول پرآب بر متضرر شود، الگوی کشت خود را به محصولات گندم، جو و ذرت تغییر می‌دهد.

نحوه تغییر تعداد کشاورزان در هر گروه با اجرای سناریوی اعمال جریمه در جدول ۵-۹ نمایش داده شده است. به‌دلیل آنکه مقادیر متغیرهای مؤثر در شکل‌دهی رفتار کشاورزان در این سناریو تغییر چندانی نمی‌کنند، تعداد کشاورزان در هر گروه رفتاری تقریباً مشابه با وضعیت بدون سناریو است. بنابراین نحوه اثرگذاری این سناریو در فرآیند

تصمیم‌گیری و محاسبات درآمد توسط کشاورزان اعمال می‌گردد و بر تمایل آن‌ها به صرفه‌جویی تأثیر چندانی نمی‌گذارد. تغییر سطح کشت محصولات در سناریوی مورد بررسی مطابق با شکل ۵-۲۳ است. نتایج حاکی از آن است که اعمال جریمه بر محصولات پرآب بر کاهش سطح زیر کشت این محصولات نسبت به شرایط کنونی را در پی داشته است. بدین ترتیب، کشاورزانی که ترجیح به عدم تغییر الگوی کشت یا کشت محصولات پرآب بر در گام زمانی فعلی دارند با بررسی هزینه‌ای که به‌عنوان جریمه باید پرداخت کنند از کشت این محصولات منصرف شده و به کشت محصولات پیشنهادی پرداخته‌اند. در این میان، سطح کشت محصول گندم تغییر چندانی نکرده و سطح زیر کشت محصولات پرآب بر بیشتر با دو محصول ذرت و جو جایگزین شده است.

جدول ۵-۹ تعداد عوامل کشاورز از هر گروه رفتاری در سناریوی اعمال جریمه برای محصولات پرآب بر

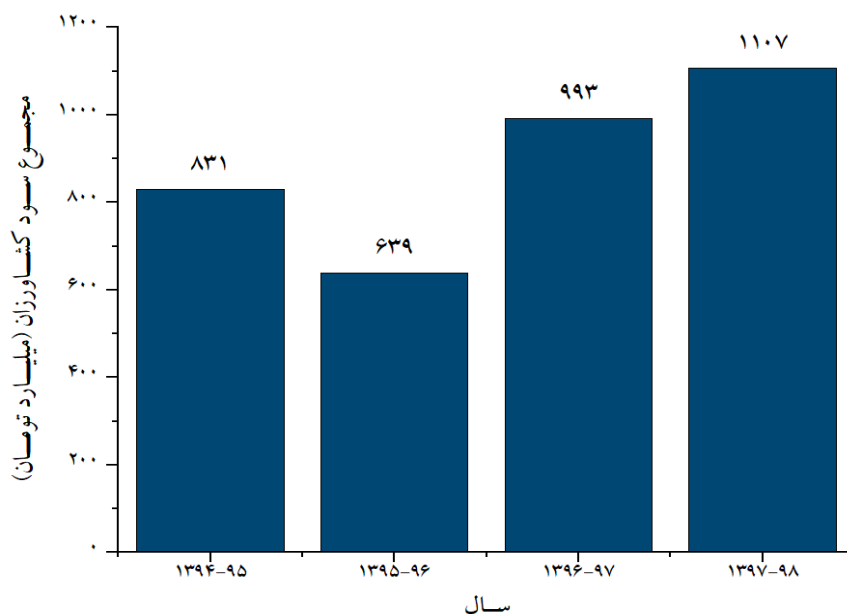
سال		۱۳۹۶-۹۷		۱۳۹۵-۹۶		۱۳۹۴-۹۵		نوع رفتار
قبل	بعد	قبل	بعد	قبل	بعد	قبل	بعد	
تصمیم‌گیری	تصمیم‌گیری	تصمیم‌گیری	تصمیم‌گیری	تصمیم‌گیری	تصمیم‌گیری	تصمیم‌گیری	تصمیم‌گیری	تعاملی
۴۱	۴۱	۳۰	۳۰	۱۵	۱۵	۳	۹	فعال
۱۴۲۵	۱۴۲۵	۱۳۹۷	۱۴۰۳	۱۳۷۲	۱۳۹۸	۱۲۴۳	۱۳۴۱	ادراکی
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	نیمه ادراکی
۲۵۸	۲۵۸	۲۹۱	۲۹۱	۳۰۸	۳۱۱	۳۷۲	۳۷۴	متخلف
۰	۰	۶	۰	۲۹	۰	۱۰۶	۰	



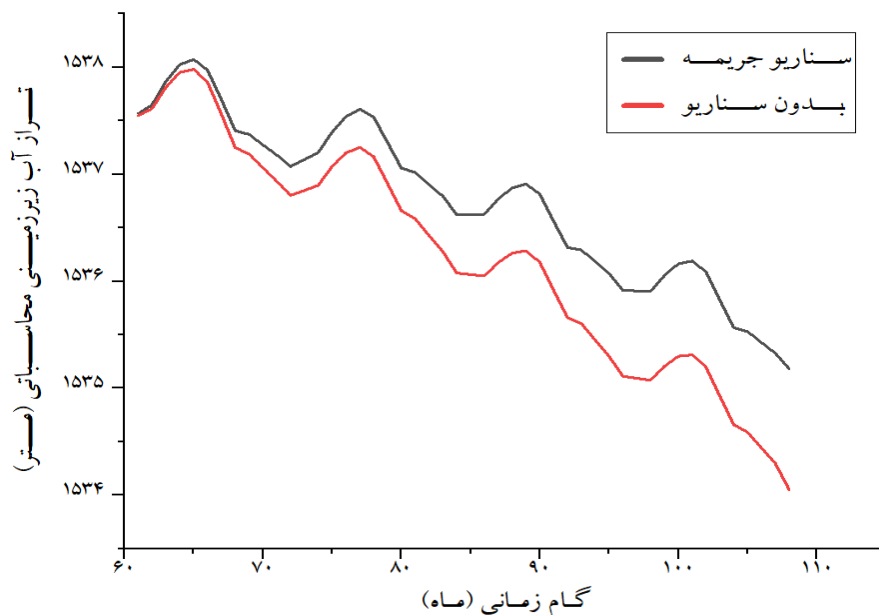
شکل ۵-۲۳ سطح کشت محصولات در دوره تصمیم‌گیری در سناریوی اعمال جریمه برای محصولات پرآب بر



سود حاصل از کشت محصولات در شکل ۵-۲۴ قابل مشاهده است. بر اساس نتایج، در ابتدای دوره تصمیم‌گیری که سطح آب زیرزمینی وضعیت بهتری داشت، تعدادی از کشاورزان پرداخت جریمه را پذیرفته و الگوی کشت خود را تغییر نداده‌اند که این امر سبب کاهش مجموع سود کشاورزان نسبت به شرایط بدون اعمال سناریو گردیده است. بر خلاف آنچه انتظار می‌رفت، در دو سال پایانی دوره تصمیم‌گیری، کشاورزان با تغییر الگوی کشت و پذیرش محصولات کم‌آب‌بر، علاوه بر اینکه تنش آبی و کاهش عملکردی کمتری را تجربه کردند، سود بیشتری نیز در مقایسه با شرایط کنونی به دست آورده‌اند. در واقع، کشاورزان با تغییر الگوی کشت سود اقتصادی بیشتری را به دست می‌آورند و اعمال یک سناریوی بازدارنده مانند سناریوی جریمه، در نهایت بهبود وضعیت اقتصادی را نتیجه می‌دهد. تراز شبیه‌سازی شده در سناریوی اعمال جریمه برای کشت محصولات منتخب و تراز آب زیرزمینی در شرایط بدون سناریو در شکل ۵-۲۵ به تصویر درآمده است. به‌طور کلی، سناریوی اعمال جریمه در مقایسه با شرایط فعلی آبخوان بهبود تراز آب زیرزمینی را نشان می‌دهد و موجب کاهش ۱۸/۳ درصدی برداشت از آبخوان شده و در واقع، در آخرین گام زمانی تراز شبیه‌سازی شده ۱/۱۵ متر نسبت به شرایط تاریخی بهبود پیدا کرده و نیز سطح آب زیرزمینی در کل دوره چهار ساله تصمیم‌گیری به‌طور میانگین بهبودی ۵۳ سانتی‌متری را به ارمغان آورده است. بدین ترتیب، اعمال جریمه را می‌توان سیاستی بازدارنده دانست که موجب کاهش برداشت‌های آب زیرزمینی و بهبود نسبی آب زیرزمینی گشته است.



شکل ۵-۲۴ مجموع سود عوامل کشاورز در سناریوی اعمال جریمه برای محصولات پرآب بر در دوره تصمیم‌گیری



شکل ۵-۲۵ میانگین تراز آب وضعیت کنونی و سناریوی اعمال جریمه برای محصولات منتخب در گستره آبخوان

#### ۵-۵-۴- سناریو بازار آب

آخرین سناریوی مورد بررسی در محدوده اصفهان\_برخوار، برقراری حالت ساده‌سازی شده‌ای از بازار آب زیرزمینی در این محدوده است. در محدوده مطالعاتی، کمبود آب مورد نیاز بخش صنایع با توجه به استقرار شهرک‌ها و کارگاه‌های صنعتی مانند شهرک صنعتی محمودآباد و دولت آباد از طریق برخی بازارهای غیررسمی بین بومیان ساکن در محدوده مطالعاتی تأمین شده است. از طرفی، مطابق با مواد ۲۷ و ۲۸ قانون توزیع عادلانه آب، در راستای بهبود بهره‌وری اقتصادی آب نیاز است تا در شرایط خاص آب بخش کشاورزی به صنعت انتقال یابد. بر این اساس، سناریوی بازار آب در این پژوهش به ارزیابی وضعیت بهبود شرایط آبخوان با در نظر گرفتن مبادلات آبی بین مصرف آب کشاورزی و صنعت می‌پردازد. فرضیات و روابط حاکم بر این سناریو مطابق با موارد زیر است:

- ۱) سناریوی بازار آب در این مطالعه از سال دوم تصمیم‌گیری در نظر گرفته می‌شود. بنابراین، به‌طور کلی بازار آب تنها برای سه سال انتهایی اعمال می‌شود.
- ۲) در این سناریو کشاورزانی واجد شرایط شرکت در بازار هستند که سود حاصل از کشاورزی در اولین سال تصمیم‌گیری برای آن‌ها منفی بوده باشد. به عبارتی دیگر، این عوامل با اجرای فعالیت کشاورزی در اولین سال اعمال محدودیت مجوزها متضرر شده‌اند.
- ۳) محاسبه سود ناشی از شرکت در بازار برای کشاورز بر اساس رابطه (۵-۱) محاسبه می‌گردد.

۴) قیمت فروش هر مترمکعب از آب برابر با قیمت بهینه پیشنهادی در مطالعه ذوالفقاری پور و احمدی (۱۴۰۰) برابر با ۵۰۰ تومان بر مترمکعب منظور می‌گردد که در طول سه سال شبیه‌سازی بازار ثابت در نظر گرفته شده است [۷۶].

۵) ضریب هزینه مبادله آب بر اساس سایر مطالعات برابر با ۰/۰۱ منظور می‌گردد [۷۶، ۱۱۱].

۶) با محاسبه سود شرکت در بازار، کشاورز میزان سود بازار را با سود تخمینی حاصل از کشاورزی مطابق با رابطه (۳-۱۵) مقایسه می‌کند؛ در صورتی که شرکت در بازار سودآورتر باشد کشاورز مجوز برداشت آب خود را به صنعت می‌فروشد.

۷) میزان آب برگشتی برای کشاورزانی که در بازار شرکت می‌کنند برابر با صفر منظور می‌گردد.

$$WMI_{i,t} = (1 - 0.5\omega)WP \times TSW_{i,t} \quad (1-5)$$

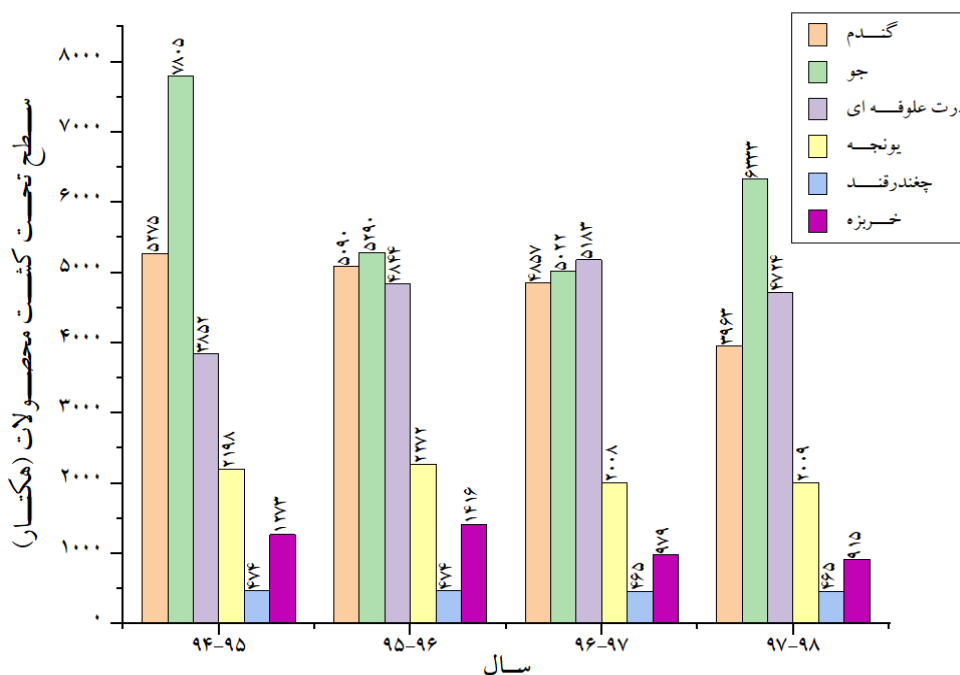
در این رابطه،  $WMI_{i,t}$  درآمد حاصل از فروش آب برای کشاورز  $i$  ام در گام زمانی  $t$ ،  $\omega$  ضریب هزینه مبادله،  $WP$  قیمت فروش آب و  $TSW_{i,t}$  حجم آب فروش رفته توسط کشاورز  $i$  در گام زمانی  $t$  می‌باشد. با اعمال فرضیات حاکم بر بازار آب، تعداد کشاورزان در هر گروه رفتاری مطابق با جدول ۵-۱۰ شبیه‌سازی می‌شود. مشابه با سناریوی اعمال جریمه، سناریوی بازار آب نیز یک سازوکار اقتصادی است و بر پارامترهای روان‌شناختی کشاورزان تأثیری نمی‌گذارد. بنابراین، تعداد هر گروه رفتاری تقریباً مشابه با حالت کنونی در محدوده مطالعاتی است.

جدول ۵-۱۰ تعداد عوامل کشاورز از هر گروه رفتاری در سناریوی بازار آب

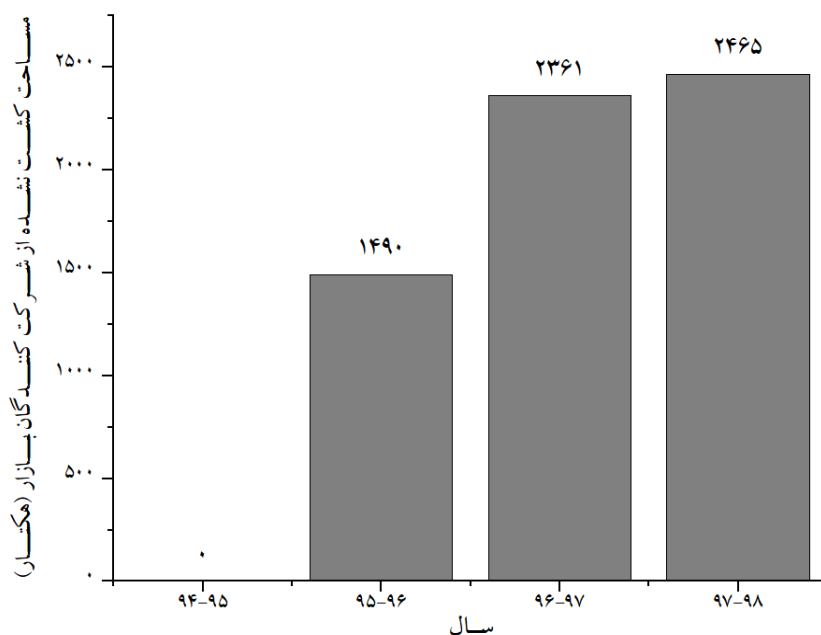
نوع رفتار	سال							
	۱۳۹۷-۹۸		۱۳۹۶-۹۷		۱۳۹۵-۹۶		۱۳۹۴-۹۵	
	قبل	بعد	قبل	بعد	قبل	بعد	قبل	بعد
تعاملی	تصمیم‌گیری	تصمیم‌گیری	تصمیم‌گیری	تصمیم‌گیری	تصمیم‌گیری	تصمیم‌گیری	تصمیم‌گیری	تصمیم‌گیری
فعال	۳۳	۳۳	۲۸	۲۸	۱۲	۱۲	۶	۱۲
ادراکی	۱۴۶۵	۱۴۶۵	۱۴۳۸	۱۴۴۶	۱۳۹۳	۱۴۲۳	۱۲۱۳	۱۳۶۷
نیمه	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
ادراکی	۲۲۶	۲۲۶	۲۵۰	۲۵۰	۲۸۸	۲۸۹	۳۳۷	۳۴۵
متخلف	۰	۰	۸	۰	۳۱	۰	۱۶۸	۰

تغییرات سطح زیر کشت در سناریوی بازار آب مطابق با شکل‌های ۵-۲۶ و ۵-۲۷ است؛ شکل ۵-۲۶ تغییرات سطح زیر کشت شش محصول منتخب را نمایش می‌دهد. مطابق با نتایج، سطح زیر کشت محصولات پرآب‌بری همچون

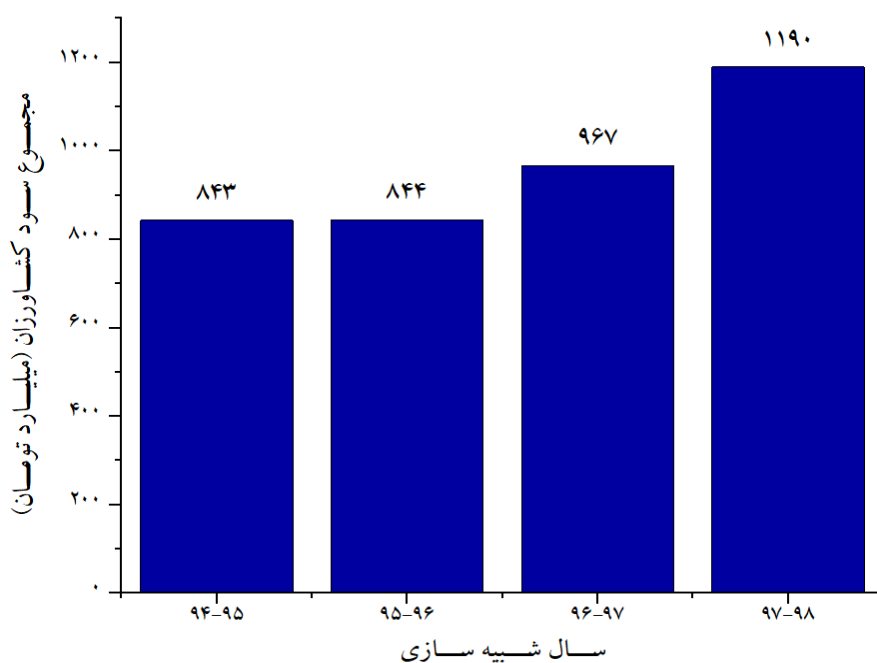
خریزه و یونجه نسبت به شرایط کنونی کاهش داشته است. ضمن اینکه در برخی موارد کشاورزانی که جو کشت کرده‌اند نیز شرکت در بازار آب را سودمندتر ارزیابی کرده و سهم آب خود را در اختیار صنعت قرار داده‌اند که کاهش سطح زیر کشت جو را نتیجه داده است. شکل ۵-۲۷ کاهش سطح کشت شده در دوره تصمیم‌گیری را نشان می‌دهد. مطابق با نتایج، در هر سال تعداد کشاورزانی که به جای کشاورزی، در بازار آب شرکت می‌کنند افزایش یافته است. دلیل این امر را می‌توان به کاهش تراز آب زیرزمینی ربط داد. با افت تراز آب زیرزمینی، محصولات کشت شده توسط کشاورز تنش آبی بیشتری را تجربه می‌کنند که عامل کاهش عملکرد محصولات کشت شده است؛ در نتیجه، کشاورزان فروش مجوزهای خود به جای انجام فعالیت کشاورزی را سودمندتر ارزیابی می‌کنند. تغییرات مجموع سود کشاورزان در سناریوی بازار آب در شکل ۵-۲۸ آورده شده است. سود کشاورزان در سال اول مشابه با سود کشاورزان در شرایط کنونی است؛ چراکه شرکت در بازار برای این سال در نظر گرفته نشد. در سال‌های بعدی نتایج از بهبود سود اقتصادی کشاورزان حکایت می‌کند؛ به طوری که در آخرین گام زمانی، سود کشاورزان ۱۴ درصد نسبت به وضعیت بدون سناریو افزایش پیدا کرده است. این امر حاکی از آن است که کشاورزانی که در بازار آب شرکت کرده‌اند، سود بیشتری نسبت به حالتی که به کشاورزی می‌پردازند، به دست آورده‌اند.



شکل ۵-۲۶ سطح کشت محصولات در دوره تصمیم‌گیری در سناریوی بازار آب



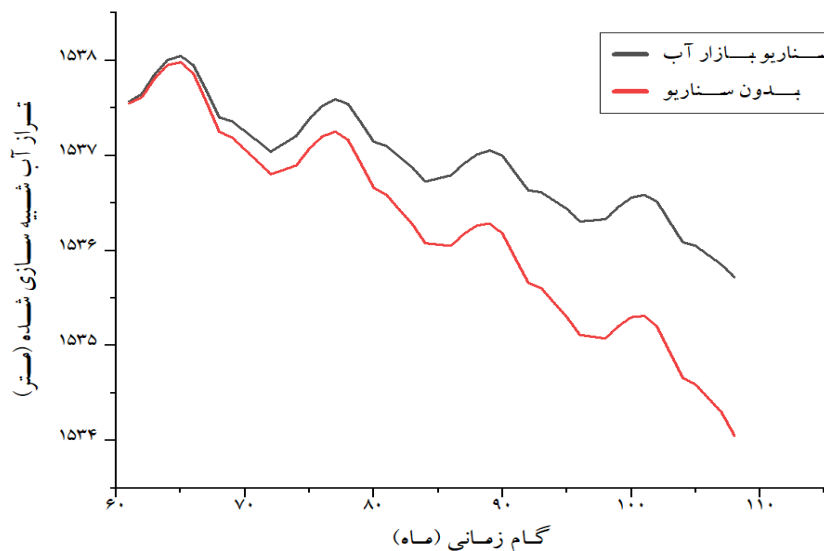
شکل ۲۷-۵ سطح تحت کشت کاهش یافته در سناریوی بازار آب زیرزمینی



شکل ۲۸-۵ مجموع سود عوامل کشاورز در سناریوی بازار آب در دوره تصمیم گیری

شکل ۲۹-۵ بهبود تراز آب زیرزمینی شبیه سازی شده با استفاده از سناریوی شرکت در بازار آب را نسبت به شرایط کنونی آبخوان اصفهان\_برخوار نشان می دهد. دلیل بهبود تراز آب زیرزمینی را می توان در این نکته دانست که میزان برداشت از چاه بهره برداری در بازار آب کاملاً مطابق با میزان محدودیت تصمیم گیری سالانه کشاورزان در برداشت از آب های زیرزمینی است و اضافه برداشتی از چاه بهره برداری صورت نمی گیرد؛ به طوری که اجرای این سناریو موجب

کاهش ۲۰ درصدی از آبخوان شده است. بر اساس نتایج، در آخرین گام زمانی، سطح آب زیرزمینی نسبت به شرایط بدون اعمال سناریو ۱/۶۶ متر بهبود یافته و در کل دوره چهار ساله نیز به طور میانگین سطح آبخوان نسبت به شرایط تاریخی ۶۹ سانتی متر بهبود داشته است.



شکل ۵-۲۹ میانگین تراز آب وضعیت کنونی و سناریوی بازار آب در گستره آبخوان

#### ۵-۶- جمع بندی

مطابق با چارچوب مطالعه پیشنهادی، نتایج حاصل از اجرای مدل در محدوده اصفهان\_برخوار در این فصل ارائه شد. در ابتدا نتایج شبیه سازی کمی آبخوان و فرضیات در نظر گرفته شده در توسعه مدل شرح داده شد و صحت مدل با ارائه نتایج خطای مدل مورد ارزیابی قرار گرفت. سپس، به منظور بررسی دقت نتایج به دست آمده توسط مدل اجتماعی\_هیدرولوژیکی، نتایج تراز آب زیرزمینی حاصل شده توسط مدل پیشنهادی ارزیابی و پس از اطمینان از صحت مدل، میزان تغییر شرایط و نتایج مدل در چهار سناریوی مدیریتی بررسی شد. خلاصه ای از نتایج مهم حاصل شده از اجرای هریک از چهار سناریوی مدیریتی در جدول ۵-۱۱ قابل مشاهده است. این جدول حاوی میانگینی چهارساله از تمامی پارامترهای مورد نظر شامل تغییرات سطح زیر کشت محصولات منتخب، تغییرات مجموع سود کشاورزان و میانگین تراز آب زیرزمینی در سناریوهای مختلف است. نتایج اجرای این سناریوها نشان می دهد که بیشترین کاهش سطح برای محصولات پر آب بری همچون یونجه، خربزه و چغندر قند در سناریوی افزایش قیمت بیشترین میزان کاهش را در مقایسه با سایر سناریوها نشان داده که این امر موجب کاهش برداشت آب زیرزمینی و به تبع آن بهبود ۴۷ سانتی متری تراز آبخوان به طور میانگین شده است و از طرفی، افزایش قیمت محصولات سود کشاورزان را به طور میانگین به میزان ۸۷/۵۳ درصد افزایش داده است. نتایج حاصل از اجرای سناریوی اجتماعی بهبود نسبی وضعیت آبخوان مورد بررسی به اندازه ۲۰ سانتی متر در دوره تصمیم گیری را نشان می دهد. از طرف دیگر، وضعیت سود کشاورزان در

این سناریو به دلیل افزایش تعداد کشاورزان با تمایل بالا به صرفه جویی به طور میانگین ۴/۴۷۳ درصد کاهش داشته است. اجرای سناریوی اعمال جریمه نیز موجب کاهش نزدیک به هزار هکتار از سطوح زیر کشت محصولات پر آب بری همچون خربزه و یونجه گردیده؛ در عوض، این سطح زیر کشت به کشت محصولاتی مانند گندم، جو و ذرت اختصاص یافته که همین امر موجب بهبود تراز میانگین آبخوان تا حد ۵۳ سانتی متر در دوره تصمیم گیری شده است؛ در این سناریو با وجود اعمال هزینه های بیشتر به کشاورزان، سود کشاورزان نه تنها کاهش نیافته بلکه با توجه به پذیرش تغییر الگوی کشت توسط کشاورزان و کاهش کشت محصولاتی که مشمول جریمه می شدند، نزدیک به ۰/۷۷ درصد بر اساس میانگین دوره چهار ساله بهبود یافته است.

جدول ۵- ۱۱ خلاصه نتایج اجرای سناریوهای مدیریتی

سناریوهای مدیریتی مورد بررسی				
نتایج	سناریو اجتماعی	سناریو افزایش قیمت محصولات کم آب بر	سناریو اعمال جریمه برای محصولات پر آب بر	بازار آب
میانگین ۴ ساله تغییر سطح کشت گندم (هکتار)	۵۵۲ هکتار افزایش	۳۵۰۰ هکتار افزایش	۲۰۵ هکتار افزایش	۳۹۰ هکتار کاهش
میانگین ۴ ساله تغییر سطح کشت جو (هکتار)	۳۳۸ هکتار کاهش	۱۱۵ هکتار افزایش	۵۰۵ هکتار افزایش	۱۱۷۴ هکتار کاهش
میانگین ۴ ساله تغییر سطح کشت ذرت (هکتار)	۳۱۱ هکتار کاهش	۲۰۶۴ هکتار کاهش	۳۳۴ هکتار افزایش	۱۴ هکتار افزایش
میانگین ۴ ساله تغییر سطح کشت یونجه (هکتار)	۱۷۲ هکتار کاهش	۸۹۰ هکتار کاهش	۵۰۰ هکتار کاهش	۴۴۷ هکتار کاهش
میانگین ۴ ساله تغییر سطح کشت خربزه (هکتار)	۱۸۸ هکتار افزایش	۶۸۱ هکتار کاهش	۵۴۸ هکتار کاهش	۱۱۵ هکتار کاهش
میانگین ۴ ساله تغییر سطح کشت چغندر (هکتار)	بدون تغییر	بدون تغییر	بدون تغییر	بدون تغییر
میانگین بهبود تراز آب	۰/۲ متر افزایش	۰/۴۷ متر افزایش	۰/۵۳ متر افزایش	۰/۶۹ متر افزایش
میانگین تغییرات سود کشاورزی (درصد)	۴/۴۷۳ درصد کاهش	۸۷/۵۳ درصد افزایش	۰/۷۶۸ درصد کاهش	۱۰ درصد افزایش

سناریوی بازار آب به عنوان آخرین سناریو، بیشترین بهبود تراز آب زیرزمینی به میزان ۶۹ سانتی متر را نتیجه داده است. در این سناریو با توجه به شرکت دادن کشاورزان در بازار آب زیرزمینی، با کاهش سطح کشت محصولات یونجه و خربزه، با وجود کاهش میزان آب برگشتی به آبخوان، برداشت آب از آبخوان کاهش پیدا کرده است. نتایج بیانگر آن است که کشاورزانی که محصولات دیگری مانند جو نیز کشت می کنند، شرکت در بازار را سودآورتر از انجام کشاورزی ارزیابی کرده و آب مصرفی خود را در اختیار صنعت قرار می دهند. در واقع، با فروش آب کشاورزی به صنعت، سود حاصل از فروش آب در محدوده موجب بهبود مجموع سود کشاورزان به میزان ۱۰ درصد گردیده است.

## فصل ششم

### نتیجه گیری و پیشنهادها

#### ۶-۱- مقدمه

شبیه سازی تعامل و بازخوردهای دوطرفه انسان و طبیعت در سیستم های آبی-انسانی با توجه به اثرات مستقیم و غیرمستقیم انسان در چرخه های هیدرولوژیکی از دیرباز مورد توجه محققین حوزه مدیریت منابع آب بوده است. با توسعه مدل های اجتماعی-هیدرولوژیکی و تعریف مفاهیمی چون تکامل هماهنگ سیستم های اجتماعی و آبی و ناهمگونی های فضائی و زمانی گام مهمی در به روز آوری شبیه سازهای مرسوم هیدرولوژیکی برداشته شد. در این راستا، مدل های عامل بنیان با شبیه سازی عوامل انسانی به عنوان اجزای خودمختار و ناهمگون روند بهبود مدل های آب-انسان را تسریع کردند. با توسعه و بهبود قدرت سیستم های رایانه ای لازم است تغییرات شرایط هیدرولوژیکی محدوده مطالعاتی با در نظر گرفتن ناهمگونی در خصوصیات فیزیکی حوضه در ارتباط کامل با یک مدل عامل بنیان مورد تحلیل قرار گیرد. این مطالعه به منظور تلاشی در راستای توسعه و بهبود مدل های عامل بنیان-آب زیرزمینی مرسوم، انجام شده است.

#### ۶-۲- جمع بندی و نتیجه گیری

در این پژوهش فرآیند انتخاب الگوی کشت توسط کشاورزان و نحوه تصمیم گیری عوامل در صرفه جویی آب کشاورزی یا برداشت بی رویه از آبخوان شبیه سازی شده است. در چارچوب توسعه یافته دو نوع عامل شبیه سازی گردید که اولین گروه، عوامل کشاورز از نوع زراعی بودند که در فرآیند تصمیم گیری محصول مورد نظر خود برای کشت در سال آبی جاری انتخاب می کنند. عامل نظارتی، دومین عامل در نظر گرفته شده است که در شبیه سازی رفتاری مورد



ارزیابی قرار نگرفته و به طور فیزیکی در مدل شبیه‌سازی نشده است؛ بلکه با محدودیت مجوز برداشت کشاورزان بر تصمیمات کشاورزان محدوده مطالعاتی تأثیر می‌گذارد.

چارچوب پیشنهادی برای سال‌های آبی ۹۰-۱۳۸۹ تا ۹۸-۱۳۹۷ در محدوده آبخوان اصفهان-برخوار توسعه یافت. مدل پیشنهادی به طور کلی شامل سه زیربخش اصلی شامل شبیه‌سازی آب زیرزمینی، مدل عامل‌بنیان و مدل بهینه‌سازی است. در اولین گام توسعه مدل، شبیه‌سازی آب زیرزمینی با استفاده از کد MODFLOW در محیط نرم‌افزار GMS توسعه یافت و مدل در دو حالت ماندگار و ناماندگار با گام زمانی ماهانه اجرا شد. در حالت ماندگار، مدل مفهومی ایجاد شده برای آبخوان اصفهان-برخوار بر اساس مقادیر اولیه پارامترهای تغذیه، تخلیه، سنگ بستر و ضریب هدایت هیدرولیکی برای گام زمانی مهرماه ۱۳۸۹ اجرا شد. واسنجی مدل MODFLOW در حالت ماندگار با بهبود مقادیر هدایت هیدرولیکی و تغذیه سطحی انجام پذیرفت. سپس، مدل آب زیرزمینی در حالت ماندگار با خطای RMSE برابر با ۰/۲۲ متر برای توسعه مدل در حالت ناماندگار به کار گرفته شد. مدل در حالت ناماندگار برای ۸۴ گام زمانی ماهانه برای سال‌های آبی ۹۰-۱۳۸۹ تا ۹۶-۱۳۹۵ بر اساس اطلاعات اولیه ضریب آبدهی ویژه اجرا شد و واسنجی مدل در حالت ناماندگار با تغییر مقادیر اولیه پارامتر آبدهی ویژه صورت گرفت و در راستای ارزیابی صحت مقادیر نهائی پارامترهای مؤثر مدل برای ۲۴ گام زمانی در دو سال آبی ۹۷-۱۳۹۶ و ۹۸-۱۳۹۷ اجرا گردید. معیار خطای RMSE در حالت واسنجی و صحت‌سنجی برای مدل نهائی برابر با ۱/۴۸۱۲ و ۱/۹۷۵۵ محاسبه شد که دقت مناسب توسعه مدل را تصدیق می‌کند. پس از توسعه مدل آب زیرزمینی، شبیه‌سازی رفتاری در چارچوب مدل عامل‌بنیان و با استفاده از نرم‌افزار NetLogo توسعه یافت. در شبیه‌سازی رفتار کشاورزان دو دوره تاریخی شامل یک دوره ۵ ساله به جهت ایجاد حافظه تاریخی در کشاورزان و یک دوره ۴ ساله تصمیم‌گیری در نظر گرفته شد. در دوره تاریخی، کشاورزان وارد عمل نمی‌شوند و اطلاعات مدل مطابق با داده‌های تاریخی تعریف گردید. سپس، با اتمام دوره حافظه تاریخی، کشاورزان به تصمیم‌گیری در مورد محصول موردنظر خود برای کشاورزی اقدام می‌کنند.

این مطالعه به جهت شبیه‌سازی فرآیند تصمیم‌گیری عوامل کشاورز از تئوری رفتار برنامه‌ریزی شده الهام گرفته است؛ بدین ترتیب، مطابق با گزارش‌های اجتماعی موجود و مصاحبه‌های در دسترس از مطالعه‌های پیشین فاکتورهای مؤثر در شکل‌دهی رفتار صرفه‌جویی کشاورزان تعیین گردید. در واقع، بر اساس اطلاعات موجود سطح رفاه کشاورز، درجه اعتماد به مسئولین و تجربه کشاورزی سازنده نگرش، تحصیلات، درک اهمیت و عواقب فرونشست و نیز وضعیت آب‌های زیرزمینی سازنده هنجارذهنی و سن، تحصیلات، تجربه کشاورزی و درجه وابستگی معیشت کشاورز به کشاورزی سازنده کنترل رفتاری درک شده مشخص شد. با کمی‌سازی مقادیر مؤلفه‌های روان‌شناختی و محاسبه تمایل کشاورزان به صرفه‌جویی، چهار دسته رفتاری اصلی برای کشاورزان اعم از تعاملی، فعال، ادراکی و نیمه‌ادراکی مشخص گردید که هر دسته رفتاری معیارهای خاص خود را در راستای انتخاب الگوی کشت در نظر می‌گیرند.

با انتخاب نوع محصول توسط کشاورز، منافع حاصل از فعالیت کشاورزی برای عوامل در مدل اجتماعی محاسبه می‌شود. سود کشاورزان در بخش محاسبه منافع بر اساس قیمت فروش محصولات و هزینه‌های کشاورزی شامل هزینه پمپاژ آب زیرزمینی و هزینه کاشت، داشت و برداشت محصولات محاسبه شده است. کسری عملکرد محصولات کشاورزی در این مطالعه به دلیل اعمال محدودیت توسط عامل نظارتی بر اساس ضریب حساسیت محصول به کم‌آبایی محاسبه گردید. با اتمام فرآیند توسعه مدل آب زیرزمینی و مدل عامل بنیان، اتصال دو سیستم با استفاده از دو کتابخانه Pynetlogo و Flopy در محیط نرم‌افزار پایتون انجام گرفت. پس از فراهم شدن امکان اتصال دو مدل، از اتصال ایجادشده در محیط برنامه‌نویسی پایتون در راستای صحت‌سنجی چارچوب عامل بنیان پیشنهادی بهره گرفته شد. این مطالعه با اتخاذ یک رویکرد کالیبره‌محور به‌جای پر کردن پرسش‌نامه و انجام مصاحبه، از توسعه یک مدل الگوریتم ژنتیک برای تخمین مقادیر ضرایب آب برگشتی و ضرایب اجتماعی در تئوری رفتار برنامه‌ریزی‌شده بهره گرفته است. در واقع، در الگوریتم ژنتیک پیشنهادی، تابع هدف، کمینه‌کردن تفاوت بین تراز آب مشاهداتی و تراز آب شبیه‌سازی‌شده در مدل هیدرولوژیکی-عامل بنیان توسعه یافته بود. متغیرهای تصمیم در الگوریتم بهینه‌سازی ضرایب آب برگشتی در کل دوره شبیه‌سازی و سه ضریب اجتماعی معادله ساختاری در تئوری رفتار برنامه‌ریزی‌شده در دوره ۵ ساله تصمیم‌گیری تعریف شد.

نتایج معیار خطای RMSE در دوره تصمیم‌گیری که مقادیر ضرایب اجتماعی تأثیرگذار هستند برابر با  $3/78$  متر و برای کل دوره شبیه‌سازی برابر با  $4/24$  متر محاسبه گردید. علاوه بر میانگین تراز آب زیرزمینی در کل آبخوان، با توجه به استفاده از یک مدل توزیعی در شبیه‌سازی آب زیرزمینی، تراز مشاهداتی و محاسباتی در تعدادی از چاه‌های مشاهداتی منتخب نیز مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت، دقت نتایج سطح زیر کشت شبیه‌سازی‌شده با شرایط واقعی برای ارزیابی صحت شبیه‌سازی رفتاری در مدل عامل بنیان مقایسه و ارزیابی شد. سپس، با ارزیابی صحت چارچوب پیشنهادی با استفاده از تراز آب زیرزمینی و سطح زیر کشت شبیه‌سازی‌شده نتایج حاصل از اجرای چهار سناریوی مدیریتی با شرایط حال حاضر محدوده مطالعاتی مقایسه گردید.

سناریوهای مورد مطالعه در این پژوهش شامل سناریوی اجتماعی، سناریوی افزایش قیمت محصولات کم‌آب بر نظیر گندم، جو و ذرت، سناریوی اعمال جریمه برای کشاورزان و سناریوی بازار آب می‌باشد. در سناریوی اجتماعی به‌عنوان اولین سناریوی مورد بررسی، مقادیر تعدادی از پارامترهای روان‌شناختی که قابلیت بهبود داشتند در وضعیت ایده‌آل فرض شد. مطابق با نتایج حاصل از اجرای این سناریو، با بهبود شرایط اجتماعی تعداد کشاورزان دو گروه رفتاری ادراکی و نیمه‌ادراکی که بیشترین میزان تمایل به صرفه‌جویی را دارند افزایش یافت. از طرفی، از آنجا که کشاورزان نیمه‌ادراکی ایجاد تعادل بین دو معیار اقتصادی و صرفه‌جویی در آب را معیار تصمیم‌گیری قرار می‌دهند، افزایش سطح زیر کشت بین دو محصول گندم و جو در سال‌های متوالی متغیر بوده است و سطح زیر کشت محصولات

پراآب‌بری مانند یونجه نیز کاهش اندکی داشته است. سود کشاورزان در این سناریو باتوجه‌به تغییر گروه رفتاری به کشاورزان با انتخاب محصول بر اساس معیار صرفه‌جویی، کاهش داشته است؛ در مقابل، سطح آب زیرزمینی بهبود چندانی را نسبت به شرایط کنونی نشان نداد.

در سناریوی افزایش قیمت محصولات کم‌آب‌بر، قیمت محصولات گندم و جو ۱۰۰ درصد و ذرت ۵۰ درصد افزایش یافت. با اعمال این شرایط، تعداد کشاورزان متخلف در هر سال به صفر کاهش پیدا کرد. سطح زیر کشت محصولات در این سناریو برای محصول گندم افزایش چشمگیری در برابر سایر محصولات داشته است. در نتیجه، افزایش سطح زیر کشت گندم و کاهش سطح کشت جو به‌عنوان محصول با نیاز آبی کمتر در این سناریو منجر به بهبود تراز آب زیرزمینی شده است؛ به‌طوری‌که تراز آب زیرزمینی در آخرین گام زمانی ۱/۰۵ متر نسبت به وضعیت تاریخی بالا آمده است؛ این در حالی است که در این سناریو سود حاصل از کشاورزی نیز برای کشاورزان افزایش پیدا کرد. در سناریوی اعمال جریمه برای کشت محصولات پراآب‌بر، در راستای بازدارندگی عوامل کشاورز نسبت به کشت محصولات پراآب‌بری همچون خربزه، چغندر و یونجه، برای کشت این محصولات از سوی عامل نظارتی جریمه اعمال می‌شود و مقدار ضریب تابع جریمه ۳۰۰ میلیون تومان اعمال شد. در این سناریو تعداد کشاورزان در هر گروه رفتاری تفاوت چندانی را نشان نداد؛ اما سطح کشت محصولات پراآب‌بر در مقایسه با شرایط کنونی کاهش داشته است. به‌طوری‌که سطح زیر کشت یونجه، چغندر و خربزه نسبت به وضعیت کنونی کاهش و سطح زیر کشت ذرت علوفه‌ای و جو افزایش یافته است. سود حاصل از فعالیت کشاورزی در این سناریو بر خلاف آنچه تصور می‌شد، ابتدا کاهش، اما در دو سال نهایی نسبت به شرایط کنونی افزایش پیدا کرده است. سناریوی اعمال جریمه برای کشت محصولات پراآب‌بر منجر به بهبود تراز آب زیرزمینی در آبخوان اصفهان-برخوار شد؛ به‌طوری‌که در ۱۰۸امین گام زمانی (شهریور ۱۳۹۸) سطح آب زیرزمینی ۱/۱۵ متر بهبود پیدا کرده است.

آخرین سناریوی مورد بررسی در این مطالعه، بررسی مبادلات بین آب کشاورزی و صنعت به‌صورت ساده‌سازی شده بود. به‌طوری‌که، کشاورزانی که از انجام کشاورزی در سال پیشین متضرر شدند فرصت شرکت در بازار را داشته باشند. قیمت مبادله آب در این سناریو برابر با ۵۰۰ تومان بر مترمکعب در نظر گرفته شد. مشابه با سازوکار سناریوی اعمال جریمه، سناریوی بازار آب تعداد کشاورزان با گروه رفتاری مشخص را تغییر چندانی نداد. بررسی وضعیت سطح زیر کشت محصولات با اجرای سناریوی بازار آب، کاهش سطح زیر کشت دو محصول پراآب‌بر خربزه و یونجه را نشان می‌دهد؛ ضمن اینکه، مجموع سود کشاورزان در این سناریو نیز نسبت به شرایط کنونی حوضه افزایش داشته است. اعمال این سناریو با وجود کاهش آب برگشتی به آبخوان به‌دلیل کاهش سطح زیر کشت محصولات، بهبود تراز آب زیرزمینی را نشان داده تا جایی که در این سناریو تراز آب زیرزمینی در آخرین گام زمانی تا ۱/۶۶ متر بهبود یافته است.

## ۳-۶- پیشنهادها

مطابق با نتایج حاصل از مدل توسعه یافته و محدودیت‌ها و فرضیات حاکم بر این مطالعه، در راستای بهبود مطالعات آتی و تحقیقات آینده پیشنهادهایی مطابق با موارد زیر ارائه می‌گردد:

(۱) در این تحقیق شبیه‌سازی وضعیت آب زیرزمینی تنها به صورت کمی صورت گرفته و پارامتر وضعیت آب زیرزمینی به عنوان عامل تأثیرگذار تعریف شده است. این درحالی است که پارامترهای کیفی آب زیرزمینی مانند وضعیت شوری و غلظت TDS نیز می‌تواند در تصمیم‌گیری کشاورزان و انتخاب الگوی کشت توسط آن‌ها تأثیرگذار باشد. دلیل این امر نیز کاهش عملکرد محصولات متناسب با شوری آب آبخوان می‌باشد. بنابراین، در مطالعات آتی می‌توان با شبیه‌سازی کیفی آبخوان تأثیر پارامترهای کیفی را نیز در رفتار کشاورزان بررسی کرد.

(۲) عوامل در نظر گرفته شده در این مطالعه تنها کشاورزان زراعی بوده و عامل نظارتی-دولتی نیز از لحاظ رفتاری بررسی نشده است. در مطالعات آتی می‌توان سایر عوامل تأثیرگذار در محدوده مطالعاتی مانند صنایع حاضر، کشاورزان باغی، گلخانه و مصرف‌کنندگان خانگی را نیز از لحاظ رفتاری بررسی کرد و در فرآیند مدل‌سازی در نظر گرفت.

(۳) روش تخمین ضرایب اجتماعی در این مطالعه، یک رویکرد کالیبره‌محور بود. علاوه بر این، عوامل مؤثر در فرآیند تصمیم‌گیری کشاورزان بر اساس گزارش‌های اجتماعی و توسعه فرضیات و سنجش آن‌ها در مدل‌سازی بررسی شده‌اند. به منظور دقیق‌تر شدن فاکتورهای روان‌شناسی در پژوهش‌های آینده می‌توان از روش پرسش‌نامه و انجام مصاحبه‌های حضوری در محدوده اصفهان-برخوار استفاده کرد.

(۴) در بررسی سیاست‌های پیشنهادی توسط وزارت نیرو مانند: استقرار صفحه‌های خورشیدی در زمین‌های کشاورزی و فروش برق تولیدی به وزارت نیرو، مسلوب کردن چاه‌های غیرمجاز و ...، می‌توان سناریوهای بیشتری مطابق با استراتژی‌های وزارت نیرو تعریف کرد.

(۵) در مطالعات سیستم‌های آبی، تغییرات اقلیمی می‌تواند در شرایط هیدرولوژیکی و فیزیکی آبخوان موردنظر تأثیر بگذارد و این تغییرات نیز به تبع می‌تواند در تصمیم‌گیری کشاورزان تأثیرگذار باشد. بدین ترتیب، در مطالعات آتی می‌توان اثرات تغییرات اقلیم را نیز در فرآیند تصمیم‌گیری کشاورزان در نظر گرفت.

(۶) در تأثیر همسایگی‌ها بر رفتار کشاورزان در تعریف روابط حاکم بر فرآیند تصمیم‌گیری کشاورزان تعاملی، تنها شکل ساده‌شده‌ای از تأثیر کشاورزان بر یکدیگر در نظر گرفته شده که با انجام مطالعه‌های شبکه‌های اجتماعی در محدوده اصفهان-برخوار می‌توان نحوه تأثیر این همسایگی‌ها را به طور دقیق‌تر ارزیابی کرد.

- [1] Food and Agriculture Organization (FAO). Coping with water scarcity, challenge of the twenty-first century. 2007.
- [2] Berglund E Z, Using Agent-Based Modeling for Water Resources Planning and Management. *J Water Resour Plan Manag.* 2015;141(11):401-525.
- [3] Al-Amin S, Berglund E Z, Mahinthakumar G, Larson K. L. Assessing the effects of water restrictions on socio-hydrologic resilience for shared groundwater systems. *J Hydrology.* 2018; 566: 872–885.
- [4] Noël P. H, Cai X. On the role of individuals in models of coupled human and natural systems: Lessons from a case study in the Republican River Basin. *Environmental Modelling & Software.* 2017; 92: 1–16.
- [5] Yazdanpanah M, Hayati M, Hochrainer-Stigler S, Zamani G. H. Understanding farmers' intention and behavior regarding water conservation in the Middle-East and North Africa: A case study in Iran. *J Environ Manage.* 2014; 135: 63–72.
- [6] Hardin G. The tragedy of the commons. *Science.* 1979; 162:1243–1248.
- [7] Bahrini A, Riggs R. J, Esmaili M. Social Choice Rules, Fallback Bargaining, and Related Games in Common Resource Conflicts. *Journal of Hydrology.* 2021; 602: 12-66.
- [8] Castilla-Rho J. C, Mariethoz G, Rojas R, Andersen M. S, Kelly B. F. J. An agent-based platform for simulating complex human–aquifer interactions in managed groundwater systems. *Environmental Modelling & Software.* 2015;73: 305–323.
- [9] Zellner M. L, Embracing Complexity and Uncertainty: The Potential of Agent-Based Modeling for Environmental Planning and Policy. 2009; 9(4): 437–457.
- [10] Sivapalan M, Savenije H. H. G, Blöschl G. Socio-hydrology: A new science of people and water. *Hydrology Process.* 2012; 26 (8):1270–1276.
- [11] Yuan S, Li X, Du E. Effects of farmers' behavioral characteristics on crop choices and responses to water management policies. *Agric Water Management.* 2021; 247:106-693.
- [12] Bahrami N, Afshar A, Afshar M. H. An agent-based framework for simulating interactions between reservoir operators and farmers for reservoir management with dynamic demands. *Agriculture Water Management.* 2021; 259: 107-237.
- [13] An L. Modeling human decisions in coupled human and natural systems: Review of agent-based models. *Ecological Modelling.* 2012; 229: 25–36.
- [14] Ligtenberg A, van Lammeren R. J. A, Bregt A. K, Beulens A. J. M. Validation of an agent-based model for spatial planning: A role-playing approach. *Computational Environmental*

- Urban System, 2010; 34 (5): 424–434.
- [15] Liu J, Dietz T, Carpenter S, Folke C. Complexity of Coupled Human and Natural Systems, *journal of Science*, 2007.
- [16] Alberti M, Asbjornsen H. Research on coupled human and natural systems (CHANS): approach, challenges, and strategies. 2011.
- [17] Zhou Y, Li W. A review of regional groundwater flow modeling. *Geoscience Frontiers*. 2011; 2 (2): 205–214.
- [18] Pahl-Wostl C. The implications of complexity for integrated resources management. *Environmental Modelling & Software*. 2005; 22 (5): 561–569.
- [19] M. Schlüter et al. New horizons for managing the environment: A review of coupled social-ecological systems modeling. *Natural Resources Modelling*. 2012; 25 (1):219–272.
- [20] Cai X. Implementation of holistic water resources-economic optimization models for river basin management – Reflective experiences. *Environmental Modelling & Software*. 2008; 23 (1): 2–18.
- [21] Harou J. J, Pulido-Velazquez M, Rosenberg D. E, Medellín-Azuara J, Lund J. R, Howitt R. E. Hydro-economic models: Concepts, design, applications, and future prospects. *Journal of Hydrology*. 2009; 375 (3–4): 627–643.
- [22] Rosenberg D. E, Howitt R. E, Lund J. R. Water management with water conservation, infrastructure expansions, and source variability in Jordan. *Water Resource Res*. 2008; 44 (11): 11-402.
- [23] Marques G. F. et al. Economically Driven Simulation of Regional Water Systems: Friant-Kern, California. *Journal of Water Resource Planning & Management*. 2006; 132 (6): 468–479.
- [24] Brown C, Rogers P. Effect of Forecast-Based Pricing on Irrigated Agriculture: A Simulation. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 2006; 132 (6): 403–413.
- [25] Zolfagharipoor M. A, Ahmadi A. Agent-based modeling of participants' behaviors in an inter-sectoral groundwater market. *Journal of Environmental Management*. 2021; 299: 113-560.
- [26] Fedra K, Kubat M. Water resources management: economic valuation and participatory multi-criteria optimization. 2007.
- [27] Ward F. A, Booker J. F, Michelsen A. M. Integrated Economic, Hydrologic, and Institutional Analysis of Policy Responses to Mitigate Drought Impacts in Rio Grande Basin. *Journal of Water Resource Planning and Management*. 2006; 132 (6): 488–502.
- [28] Volk M et al. Integrated ecological-economic modelling of water pollution abatement management options in the Upper Ems River Basin. *Journal of Ecological Economics*. 2008; 66 (1): 66–76.
- [29] Zhu T, Lund J. R, Jenkins M. W, Marques G. F, R. S. Ritzema. Climate change, urbanization, and optimal long-term floodplain protection. *Wiley Online Library*. 2007; 43 (6): 21-64.
- [30] Schreinemachers P, Berger T. Land use decisions in developing countries and their representation in multi-agent systems. 2007;1 (1): 29–44.
- [31] Ng T. L, Eheart J. W, Cai X, Braden J. B. An agent-based model of farmer decision-making

- and water quality impacts at the watershed scale under markets for carbon allowances and a second-generation biofuel crop. *Water Resource Res.* 2011; 47 (9): 19-95.
- [32] Mulligan K. B, Brown C, Yang Y. C. E, Ahlfeld D. P. Assessing groundwater policy with coupled economic-groundwater hydrologic modeling. *Water Resource Res.* 2014; 50 (3):2257–2275.
- [33] Ghadimi S, Ketabchi H. Possibility of cooperative management in groundwater resources using an evolutionary hydro-economic simulation-optimization model. *Journal of Hydrology.* 2019;578: 94-124.
- [34] Castillo G. M. L, Engler A, Wollni M. Planned behavior and social capital: Understanding farmers' behavior toward pressurized irrigation technologies. *Agriculture Water Management.* 2021;243: 106-524.
- [35] Monteleone S, De Moraes E. A, Maia R. F. Analysis of the variables that affect the intention to adopt Precision Agriculture for smart water management in Agriculture context. *Global IoT Summit.* 2019.
- [36] Elshafei Y, Coletti J. Z, Sivapalan M, Hipsey M. R. A model of the socio-hydrologic dynamics in a semiarid catchment: Isolating feedbacks in the coupled human-hydrology system. *Water Resource Res.* 2015; 51 (8): 6442–6471.
- [37] Madani K, Shafiee-Jood M, *Socio-Hydrology: A New Understanding to Unite or a New Science to Divide?*. 2020;12(7): 1941.
- [38] Falkenmark M, Main problems of water use and transfer of technology. *Geo Journal.* 1979; 3 (5) :435–443.
- [39] Sivapalan M et al. *Socio-hydrology: Use-inspired water sustainability science for the Anthropocene.* *Earths Future.* 2014; 2 (4): 225–230.
- [40] Blair P, Buytaert W. *Socio-hydrological modelling: A review asking ‘why, what and how?.* *Hydrological Earth System Science.* 2016; 20(1): 443–478.
- [41] Wheater H. S, *Progress in and prospects for fluvial flood modelling.* *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences.* 200;360 (1796):1409–1431.
- [42] Beven K. *Changing ideas in hydrology — The case of physically-based models.* *Journal Hydrology.* 1989; 105(1–2): 157–172.
- [43] Malanson G. E. *Considering Complexity.* 2010; 89 (4): 746–753.
- [44] Sivapalan M, Blöschl G, Zhang L, Vertessy R. *Downward approach to hydrological prediction.* *Hydrology Process.* 2003; 17 (11): 2101–2111.
- [45] Mirchi A, Madani K, Watkins D, Ahmad S. *Synthesis of System Dynamics Tools for Holistic Conceptualization of Water Resources Problems.* *Water Resources Management.* 2012; 26(9): 2421–2442.
- [46] Folke C, Carpenter S. R, Walker B, Scheffer M, Chapin T, Rockström J. *Resilience thinking: Integrating resilience, adaptability and transformability.* *Ecology and Society.* 2010; 15(4).
- [47] Liu X, Li X, Anthony G. O. Y. *Multi-agent systems for simulating spatial decision behaviors and land-use dynamics.* *Sci China Ser D Earth Sci.* 2006; 49(11): 1184–1194.
- [48] Kandasamy J, Sountharajah D, Sivabalan P, Chanan A, Vigneswaran S, Sivapalan M. *Socio-hydrologic drivers of the pendulum swing between agricultural development and environmental health: A case study from Murrumbidgee River basin, Australia.* *Hydrological*

- Earth System Science. 2014;18(3):1027–1041.
- [49] Srinivasan V, Lambin E. F, Gorelick S. M, Thompson B. H, Rozelle S. The nature and causes of the global water crisis: Syndromes from a meta-analysis of coupled human-water studies. *Water Resource Res*, 2012; 48(10):10516.
- [50] Farmer J. D, Foley D. The economy needs agent-based modelling. *Nature*. 2009; 460(7256): 685–686.
- [51] Kelly R. A, et al. Selecting among five common modelling approaches for integrated environmental assessment and management. *Environmental Modelling & Software*. 2013;47:159–181.
- [52] Lempert R. Agent-based modeling as organizational and public policy simulators. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2002;99: 7195–7196.
- [53] Schlüter M, Pahl-Wostl C. Mechanisms of resilience in common-pool resource management systems: An agent-based model of water use in a river basin. *Ecology and Society*. 2007; 12(2) 2007.
- [54] Srinivasan V. Reimagining the past - Use of counterfactual trajectories in socio-hydrological modelling: The case of Chennai, India. *Hydrology Earth Syst Sci*. 2015; 19(2): 785–801.
- [55] House-Peters L. A, Chang H. Urban water demand modeling: Review of concepts, methods, and organizing principles. *Water Resource Res*. 2011; 47(5).
- [56] Brooks D. B. An Operational Definition of Water Demand Management. 2007; 22(4):521–528.
- [57] Akhbari M, Grigg N. S. Managing water resources conflicts: Modelling behavior in a decision tool. *Water Resources Management*. 2015; 29(14): 5201–5216.
- [58] Giuliani M, Li Y, Castelletti A, Gandolfi C. A coupled human-natural systems analysis of irrigated agriculture under changing climate. *Water Resource Res*. 2016;52(9): 6928–6947.
- [59] Galán J. M, López-Paredes A, Del Olmo R. An agent-based model for domestic water management in Valladolid metropolitan area. *Water Resource Res*. 2009; 45(5).
- [60] Kanta L, Zechman E. Complex Adaptive Systems Framework to Assess Supply-Side and Demand-Side Management for Urban Water Resources. *Journal Water Resource Planning & Management*. 2013;140(1): 75–85.
- [61] Darbandsari P, Kerachian R, Malakpour-Estalaki S. An Agent-based behavioral simulation model for residential water demand management: The case-study of Tehran, Iran. *Simul Model Pract Theory*. 2017;78: 51–72.
- [62] Mashhadi A., Shafiee M. E, Berglund E. Z. Agent-based modeling to simulate the dynamics of urban water supply: Climate, population growth, and water shortages. *Sustain Cities Soc*. 2017;28: 420–434.
- [63] Darbandsari P, Kerachian R, Malakpour-Estalaki S, Khorasani H. An agent-based conflict resolution model for urban water resources management. *Sustain Cities Soc*. 2020;57:102–112.
- [64] Bakhtiari P. H, Nikoo M. R, Izady A, Talebbeydokhti N. A coupled agent-based risk-based optimization model for integrated urban water management. *Sustain Cities Soc*. 2019; 53:101-922.
- [65] Akhbari M, Grigg N. S. Managing water resources conflicts: Modelling behavior in a decision tool. *Water Resources Management*. 2015; 29(14):5201–5216.



- [66] Nikolic V. V, Simonovic S. P. Multi-method Modeling Framework for Support of Integrated Water Resources Management. *Environmental Processes*. 2015;2(3):461–483.
- [67] Xiao Y, Fang L, Hipel K. W. Agent-Based Modeling Approach to Investigating the Impact of Water Demand Management. *Journal Water Resource Planning & Management*. 2018; 144(3).
- [68] Bakhtiari P. H, Nikoo M. R, Izady A, Talebbeydokhti N. A coupled agent-based risk-based optimization model for integrated urban water management. *Sustain Cities Soc*. 2020;53:101-922.
- [69] Akhbari M, Grigg N. S. A Framework for an Agent-Based Model to Manage Water Resources Conflicts. *Water Resources Management*. 2013; 27(11): 4039–4052.
- [70] Wens M. et al. Simulating Small-Scale Agricultural Adaptation Decisions in Response to Drought Risk: An Empirical Agent-Based Model for Semi-Arid Kenya. *Frontiers in Water*. 2020;2.
- [71] Booyesen M. J, Visser M, Burger R. Temporal case study of household behavioural response to Cape Town's 'Day Zero' using smart meter data. *Water Resource*. 2019;149:414–420.
- [72] Yuan S, Li X, Du E. Effects of farmers' behavioral characteristics on crop choices and responses to water management policies. *Agricultural Water Management*, 2021;247:106-693.

[۷۳] بهرامی ن، بهره‌برداری بهینه از مخازن آب کشاورزی، با استفاده از مدل‌سازی عامل‌مبنا برای منظور کردن اثرات متقابل کشاورزان و سیاست‌گذاران، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی عمران، پایان‌نامه کارشناسی ارشد؛ ۱۳۹۸

- [74] Shoushtarian F, Negahban-Azar M, Crooks A. Investigating the micro-level dynamics of water reuse adoption by farmers and the impacts on local water resources using an agent-based model. *Socio-Environmental Systems Modelling*. 2022;4: 18148–18148.
- [75] Du E, Cai X, Brozović N, Minsker B. Evaluating the impacts of farmers' behaviors on a hypothetical agricultural water market based on double auction. *Water Resource Res*. 2017;53(5):4053–4072.

[۷۴] ذوالفقاری پور م، مدل‌سازی متمرکز و غیرمتمرکز بازار بین‌بخشی آب زیرزمینی در مقیاس محلی، مطالعه موردی: دشت اصفهان-برخوار، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی عمران، رساله دکتری مهندسی عمران-مهندسی و مدیریت منابع آب؛ ۱۴۰۰

- [77] Ghoreishi M, Razavi S, Elshorbagy A. Understanding human adaptation to drought: agent-based agricultural water demand modeling in the Bow River Basin, Canada. 2021.
- [78] Ghoreishi M, Sheikholeslami R, Elshorbagy A, Razavi S, Belcher K. Peering into agricultural rebound phenomenon using a global sensitivity analysis approach. *Journal of Hydrology* . 2021;602: 126-739.
- [79] Giacomoni M. H, Kanta L, Zechman E. M. Complex Adaptive Systems Approach to Simulate the Sustainability of Water Resources and Urbanization. *Journal Water Resource Planning Management*. 2013;139(5):554–564.
- [80] Khan H. F, Yang Y. C. E, Xie H, Ringler C. A coupled modeling framework for sustainable

- watershed management in transboundary river basins. *Hydrology Earth Syst Sci.* 2017;21(12):6275–6288.
- [81] Du E. et al. Evaluating Distributed Policies for Conjunctive Surface Water-Groundwater Management in Large River Basins: Water Uses Versus Hydrological Impacts. *Water Resource Res.* 2022;58(1).
- [82] Troy T. J, Pavao-Zuckerman M, Evans T. P. Debates—Perspectives on socio-hydrology: Socio-hydrologic modeling: Tradeoffs, hypothesis testing, and validation. *Water Resource Res.* 2015; 51(6):4806–4814.
- [83] Palmer P. I, Smith M. J. Earth systems: Model human adaptation to climate change. *Nature.* 2014;512(7515): 365–366.
- [84] Filatova T, Verburg P. H, Parker D. C, Stannard C. A. Spatial agent-based models for socio-ecological systems: Challenges and prospects. *Environmental Modelling & Software.* 2013; 45: 1–7.
- [85] Sivapalan M, Debates—Perspectives on socio-hydrology: Changing water systems and the ‘tyranny of small problems’—Socio-hydrology. *Water Resource Res.* 2015;51(6):4795–4805.
- [۸۶] مسائلی ی، مدل‌سازی به‌هم‌پیوسته سیستم‌های اجتماعی-هیدرولوژیکی به‌منظور شبیه‌سازی رفتار بهره‌برداران بخش کشاورزی با استفاده از رویکرد عامل‌بنیان، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی عمران، پایان‌نامه کارشناسی ارشد عمران-مهندسی و مدیریت منابع آب؛ ۱۴۰۱
- [87] Ohab-Yazdi S. A, Ahmadi A. Using the agent-based model to simulate and evaluate the interaction effects of agent behaviors on groundwater resources, a case study of a sub-basin in the Zayandehroud River basin. *Simulation Model Practical Theory.* 2018;87:274–292.
- [88] Nouri A., Saghafian B., Delavar M., Bazargan-Lari M. R. Agent-Based Modeling for Evaluation of Crop Pattern and Water Management Policies. *Water Resources Management.* 2019; 33(11):3707–3720.
- [89] Bithell M, Brasington J, Richards K. Discrete-element, individual-based and agent-based models: Tools for interdisciplinary enquiry in geography?. *2008;39(2):625–642.*
- [90] Valizadeh N, Bijani M, Hayati D, Fallah Haghghi N. A Comparative Analysis of Behavioral Theories towards Farmers’ Water Conservation. *International Journal of Agricultural Management and Development.* 2019;9(1):1–10.
- [91] STRECHER V. J, ROSENSTOCK, I. M. The health belief model. *Cambridge handbook of psychology. health and medicine.* 1997.
- [۹۲] جهانگیری م، توسعه مدل عامل‌بنیان جهت شبیه‌سازی-بهینه‌سازی رفتار کشاورزان و الگوی کشت بهینه؛ مطالعه موردی: دشت عجب‌شیر، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی عمران، پایان‌نامه کارشناسی ارشد عمران-مهندسی محیط‌زیست؛ ۱۴۰۰
- [93] Stern P, Dietz T, Abel T, Guagnano G. A value-belief-norm theory of support for social movements: The case of environmentalism. *JSTOR.* 1999.
- [94] Su H, Zhao X, Wang W, Jiang L, Xue B. What factors affect the water saving behaviors of farmers in the Loess Hilly Region of China?. *Journal of Environmental Management.*

- 2021;292:112-683.
- [95] Kaiser F. G, Hübner G, Bogner F. X. Contrasting the theory of planned behavior with the value-belief-norm model in explaining conservation behavior. *J Appl Soc Psychol*, vol. 35, no. 10, pp. 2150–2170, Oct. 2005, doi: 10.1111/J.1559-1816.2005.TB02213.X.
- [96] Fishbein M, Ajzen I. *Belief, Attitude, Intention and Behaviour An Introduction to Theory and Research* Reading, MA Addison-Wesley. - References - Scientific Research Publishing. 1975.
- [97] Ajzen, I., Fishbein, M. *Understanding Attitudes and Predicting Social Behavior*. Englewood Cliffs, NJ Prentice- Hall. - References. 1980.
- [98] Ajzen I. *From Intentions to Actions: A Theory of Planned Behavior*. 1985.
- [99] Ajzen I. The theory of planned behavior. 1991;50(2):179–211.
- [100] Ajzen I. Perceived behavioral control, self-efficacy, locus of control, and the theory of planned behavior. 2002;32(4):665–683.
- [101] Tama R. A. Z, Ying L, Yu M, Hoque M. M, Adnan K. M, Sarker S. A. Assessing farmers' intention towards conservation agriculture by using the Extended Theory of Planned Behavior. *Journal Environmental Management*. 2021;280:111-654.
- [102] Koutiva I, Makropoulos C. Modelling domestic water demand: An agent based approach. *Environmental Modelling & Software*. 2016;79: 35–54.
- [103] Pouladi P, Afshar A, Afshar M. H, Molajou A, Farahmand H. Agent-based socio-hydrological modeling for restoration of Urmia Lake: Application of theory of planned behavior. *Journal Hydrology* .2019; 576:736–748.
- [104] Kasargodu Anebagilu P, Dietrich J, Prado-Stuardo L, Morales B, Winter E, Arumi J. L. Application of the theory of planned behavior with agent-based modeling for sustainable management of vegetative filter strips. *Journal Environmental Management*, 2021;284:112014.
- [105] Hyun J. Y, Huang S. Y, Yang Y. C. E, Tidwell V, Macknick J. Using a coupled agent-based modeling approach to analyze the role of risk perception in water management decisions. *Hydrological Earth System Science*. 2019;23(5):2261–2278.
- [106] Todd D. K, Mays L.W. *Groundwater Hydrology*. 2004.
- [107] Wang H, Anderson M. *Introduction to groundwater modeling: finite difference and finite element methods*. 1995.
- [108] McDonald M, Harbaugh A. a modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model. 1988.
- [109] McDonald M, Harbaugh A. user documentation for modflow-96.1996.
- [110] “MODFLOW-2000, The U.S. Geological Survey modular ground-water model: User guide to modularization concepts and the ground-water flow process | U.S. Geological Survey. 2000.
- [111] Aghaie V, Afshar A, Alizadeh H. Socio-hydrological agent-based modelling for analyzing the impacts of supply enhancement strategies on the cap-and-trade scheme. 2021;66(4):555–564.

[۱۱۱] صفوی ح، هیدرولوژی مهندسی، انتشارات ارکان دانش، ۳۷۳–۴۶۵؛ ۱۳۹۳

- [۱۱۲] شرکت مهندسين مشاور جاماب. گزارش پايان کار مطالعات اجتماعی سند مدیریت حوضه آبریز زاینده رود ۱۴۰۱؛
- [113] Jaxa-Rozen M, Kwakkel J. H, Bloemendal M. A coupled simulation architecture for agent-based/geohydrological modelling with NetLogo and MODFLOW. Environmental Modelling & Software.2019;115:19–37.
- [114] Li M, Zhang J, Cheng X, Bao Y. Application of the genetic algorithm in water resource management. Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020; 1117 :1681–1686.
- [۱۱۵] موسسه تحقیقات آب کشور. مطالعات بهنگام سازی طرح جامع کشور-حوضه آبریز گاوخونی؛ ۱۳۹۱
- [۱۱۶] شرکت سهامی آب منطقه ای اصفهان. مطالعات منابع و مصارف حوضه آبریز زاینده رود؛ ۱۳۸۷
- [۱۱۷] دفتر برنامه ریزی کلان آبفا. سالنامه آماری آب کشور؛ ۱۳۹۱
- [۱۱۸] گروه تلفیق و بیان شرکت آب منطقه ای اصفهان. تدوین سامانه اطلاعات جغرافیائی دفتر مطالعات پایه منابع آب شرکت آب منطقه ای استان اصفهان؛ ۱۳۹۵
- [۱۱۹] شرکت مهندسين مشاور زاینده آب. بهنگام سازی بیان منابع آب محدوده های مطالعاتی حوضه آبریز گاوخونی منتهی به سال ۹۰-۱۳۸۹؛ ۱۳۹۵
- [۱۲۰] شرکت مهندسين مشاور زاینده آب. بهنگام سازی بیان منابع آب محدوده های مطالعاتی حوضه آبریز گاوخونی منتهی به سال ۹۰-۱۳۸۹، محدوده مطالعاتی اصفهان-برخوار؛ ۱۳۹۴
- [۱۲۱] شرکت مهندسين مشاور آبگستران میهن. وضعیت موجود تصفیه خانه های فاضلاب استان اصفهان ”طرح مطالعات جامع پساب استان اصفهان؛ ۱۳۹۷
- [۱۲۲] شرکت آب منطقه ای اصفهان، شرکت بهره برداری میراب زاینده رود. اطلاعات آماری مربوط به حجم آب تخصیصی به شبکه آبیاری برخوار؛ ۱۳۹۸
- [۱۲۳] شرکت مهندسين مشاور آبگستران میهن. برنامه ریزی منابع و مصارف پساب فاضلاب تصفیه خانه شاهین شهر؛ ۱۳۹۶
- [۱۲۴] شرکت مهندسين مشاور آبگستران میهن. طرح مطالعات جامع پساب استان اصفهان، برنامه ریزی منابع و مصارف پساب فاضلاب تصفیه خانه های شمال، جنوب و شرق اصفهان؛ ۱۳۹۶
- [۱۲۵] مطالعات پایه منابع آب. گزارش تمدید ممنوعیت آبخوان اصفهان-برخوار؛ ۱۳۸۵
- [۱۲۶] سازمان برنامه و بودجه کشور. شاخص کلان اقتصادی و اجتماعی کشور؛ ۱۴۰۱
- [۱۲۷] سازمان برنامه و بودجه استان اصفهان. سالنامه آماری شهرستانی استان اصفهان؛ ۱۳۹۵
- [128] Allen R. G, Pereira L. S, Raes D, Smith M. Crop evapotranspiration-Guidelines for

computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. 1998.

[129] F.A.O. Yield Response to water-original. 1979.

[۱۳۰] دفتر حفاظت و بهره برداری منابع آب و امور مشترکین. دشت های ممنوعه کشور؛ ۱۳۹۲

[131] OstadAliAskari K, et al. Effect of management strategies on reducing negative impacts of climate change on water resources of Isfahan-Borkhar aquifer using MODFLOW. River Resource Application.2019;35:611-631.

[۱۳۲] شرکت مهندسين مشاور آب پويش بنا. مطالعات مرحله يكم تامين و بازگرداني آب در رودخانه زاینده رود در محدوده شهر اصفهان، جلد ششم، فصل دوازدهم: هیدرولیک رودخانه؛ ۱۳۹۳

[۱۳۳] کارآموز م، احمدی آ، فلاحی م. مهندسی سیستم، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر؛ ۱۳۹۲