اکوهیدرولوژی

دورهٔ ۵، شمارهٔ ۲، تابستان ۱۳۹۷، ص ۴۹۵-۴۸۳

تعیین بهینه‌ترین حالت طراحی و اجرای حوضچه‌های تغذیهٔ مصنوعی

امید باقری دادوکلایی[۱]، جمال محمدولی سامانی[۲]، جواد سروریان[۳*]

۱. کارشناس ارشد، سازه‌های آبی، دانشکدهٔ کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۲. استاد، گروه سازه‌های آبی دانشکدهٔ کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۳. استادیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه ایلام

(تاریخ دریافت ۱۳۹۶/۰۴/۰۱؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۶/۱۱/۱۲)

چکیده

برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی و جایگزین نشدن آنها، در بسیاری از آبخوان‌های کشور موجب کاهش سطح آب زیرزمینی شده است. بنابراین، تعیین مناطق مناسب برای تغذیهٔ مصنوعی به‌عنوان راهکاری برای جبران این مشکل، اهمیت زیادی دارد. هدف از این تحقیق در مرحلهٔ اول، مکان‌یابی حوضچه‌های تغذیهٔ مصنوعی با استفاده از روش منطق فازی و در مرحلهٔ بعد انتخاب گزینهٔ برتر طراحی این حوضچه‌هاست. برای انتخاب گزینهٔ برتر به منظور طراحی حوضچه‌های تغذیهٔ مصنوعی از نسبت درآمد به هزینهٔ حوضچه‌ها استفاده شد. به این منظور، پنج سناریوی ارتفاعی تعریف شد. برای پارامتر درآمد که شامل حجم نفوذ آب می‌شود، هر یک از سناریوها در نرم‌افزار Hec-HMS اجرا شده و بر اساس سرعت نفوذ پایه، مقدار درآمد هر یک از سناریوها تعیین شد. هزینهٔ هر یک از سناریوها نیز بر اساس مصالح به‌کاررفته و سایر پارامترها محاسبه شد. نتایج نشان داد اراضی مناسب برای اجرای طرح تغذیهٔ مصنوعی با به‌کارگیری منطق فازی ۰/۸۶ درصد بسیار مناسب و ۴/۷۰ درصد مناسب تشخیص داده شد. برای انتخاب گزینهٔ برتر در طراحی حوضچه‌های تغذیه، بر اساس تابع هدف درآمد به هزینه، سناریوی ارتفاع خاکریز ۲/۵ متر بهترین شرایط و بر اساس تغییرات درآمد سناریوی ارتفاع خاکریز دو متر بهترین حالت برای احداث طرح تغذیهٔ مصنوعی را دارد.

کلیدواژگان: آب‌های زیرزمینی، تغذیهٔ مصنوعی، حوضچه‌های تغذیه، طراحی بهینهٔ حوضچه‌ها، منطق فازی.

* نویسندهٔ مسئول

Email: j.sarvarian@gmail.com

مقدمه

حجم زیادی از آب مورد نیاز بشر در زیر سطح زمین جای دارد و روند افزایش جمعیت، گسترش صنایع و نیاز بشر به آب برای تأمین غذای بشر، سبب شده است که به آب‌های زیرزمینی پیش از پیش توجه شود. امروزه، تخلیهٔ آب‌های زیرزمینی و جایگزین‌نشدن آب این منابع، یکی از مشکلات بزرگ در مسائل مهندسی آب محسوب می‌شود. با توجه به ارزش و اهمیت آب، مطالعه و بررسی منابع آب زیرزمینی و چگونگی بهره‌برداری از آن مورد توجه قرار می‌گیرد. تغذیهٔ مصنوعی یکی از روش‌هایی است که می‌تواند بخشی از آب خارج‌شده از زیر زمین را جایگزین کند و یکی از روش‌های مناسب برای مهار و استفادهٔ بهینه از سیلاب در مناطق خشک و نیمه‌خشک به‌شمار می‌رود [۱].

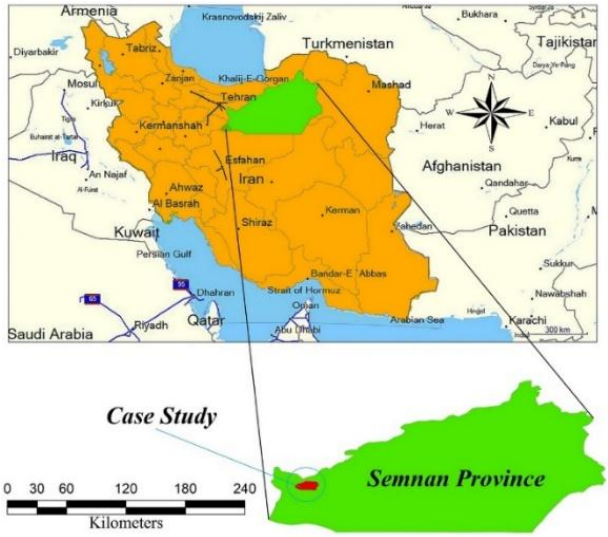
نخستین مرحله در عملیات تغذیهٔ مصنوعی، مکان‌یابی مناطق مناسب برای اجرای طرح تغذیه است. در دهه‌های اخیر، به منظور مکان‌یابی روش‌ها و تحقیقات متعددی در ایران و جهان اجرا شده است که ازجمله می‌توان به تحقیقات چودهوری و همکارانش [۲]، راحمان و همکارانش [۳]، خدیجا و همکارانش [۴]، سیف و همکارانش [۵] و نسیمی و همکارانش [۶] اشاره کرد. چودهوری و همکارانش با استفاده از تکنیک‌های MCDM مناطق مناسب برای تغذیهٔ مصنوعی آب‌های زیرزمینی را در منطقهٔ مدیناپور غربی تعیین کردند. نتایج تحقیق آنها بیان‌کنندهٔ کارایی تکنیک‌های MCDM در تلفیق با GIS در تعیین مناطق مناسب برای تغذیهٔ مصنوعی آب‌های زیرزمینی است [۲]. راحمان و همکارانش توانستند با استفاده از روش‌های WLC و قانون تصمیم‌گیری OWA محل‌های مناسب تغذیهٔ مصنوعی را به‌خوبی مشخص کنند و به نتایج خوبی برسند [۳]. خدیجا و همکارانش تحقیقی را برای توسعهٔ روشی برای استقرار و رتبه‌بندی مکان‌های مناسب برای تغذیهٔ مصنوعی آب‌های زیرزمینی با استفاده از آب بازیافت‌شدهٔ حاصل از تصفیهٔ فاضلاب انجام دادند. هفت محدودیت برای شناسایی مناطق مناسب برای تغذیهٔ آبخوان انتخاب شدند. برای رتبه‌بندی سه معیار اصلی، جنبه‌های فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی شناسایی شد که از آنها نیز ۱۲ زیرمعیار به دست آوردند. همهٔ این معیارها در یک ساختار سیستم سلسله‌مراتبی قرار داده شده و ماتریس مقایسهٔ زوجی برای آنها تهیه شد. در نهایت، چهار منطقه را برای استقرار حوضچه‌های تغذیهٔ مصنوعی انتخاب کردند [۴]. نسیمی و همکارانش از میزان بارش، شیب، نفوذپذیری سطحی، زمین‌شناسی، هدایت الکتریکی آبخوان، عمق سطح ایستابی، قابلیت انتقال آبخوان و کاربری زمین به عنوان عوامل مؤثر در مکان‌یابی تغذیهٔ مصنوعی حوضهٔ آبخیز بوشکان استفاده کردند [۶]. درنهایت، سه منطقهٔ آبرفتی برای تغذیهٔ مصنوعی با اهداف کوتاه‌مدت و یک منطقهٔ آبرفتی برای تغذیهٔ مصنوعی با اهداف بلندمدت انتخاب کردند. سیف و همکارانش به کمک روش TOPSIS و با استفاده از ۱۳ پارامتر مؤثر مطالعهٔ خود را بر حوضهٔ آبی رفسنجان انجام دادند. در ادامهٔ تحقیق بر اساس عامل ارتفاع حوضهٔ آبی رفسنجان را به شش منطقهٔ جداگانه تقسیم کردند. این شش منطقه را بر اساس مدل تاپسیس ارزیابی کرده و در نهایت اولویت این شش منطقه را از نظر تغذیهٔ مصنوعی مشخص کردند. رحیمی و همکارانش دشت گره بایگان ایران را با هدف تعیین بهترین مکان مناسب برای پخش سیلاب و هدایت آن به سازندهای نفوذپذیر برای تغذیهٔ مصنوعی مطالعه کردند. آنها از ترکیب روش تحلیل سلسله‌مراتبی و الگوریتم ژنتیک برای وزن‌دهی استفاده کردند [۷]. فرجی سبکبار و همکارانش بر پایهٔ تلفیق روش‌های ANP و مقایسهٔ زوجی در محیط GIS و با درنظرگرفتن هشت پارامتر تأثیرگذار شیب، کیفیت آب، زمین‌شناسی، کاربری اراضی، قابلیت انتقال، ژئومورفولوژی و تراکم زهکشی به تعیین عرصه‌های مناسب برای تغذیهٔ مصنوعی در دشت گره بایگان فسا پرداختند [۸]. همان‌طور که اشاره شد، در زمینهٔ مکان‌یابی مناطق مناسب برای تغذیهٔ مصنوعی آب زیرزمینی، تحقیقات زیادی انجام شده است که بیشتر روی انتخاب پارامترهای مختلف و تعیین مناطق مستعد برای امر تغذیهٔ مصنوعی متمرکز شده‌اند. در این تحقیق علاوه بر مکان‌یابی حوضچه‌های تغذیهٔ مصنوعی با استفاده از روش منطق فازی، بحث طراحی بهینهٔ این حوضچه‌ها نیز در نظر گرفته شده است.

مواد و روش‌ها

منطقهٔ مطالعه‌شده

محدودهٔ مطالعه‌شده به مساحت ۵۳۳/۵ کیلومترمربع قسمتی از دشت گرمسار واقع در استان سمنان است که در محدودهٔ "۵۲°۱۴'۲۳ تا "۵۲°۳۶'۴۵ طول شرقی و "۳۵°۰۵'۴۶ تا "۳۵°۱۷'۳۲ عرض شمالی قرار دارد و توسط رودخانهٔ حبله‌رود تغذیه می‌شود (شکل ۱). این

دشت آبخوان نسبتاً مناسبی دارد که توسط چاه‌های عمیق و نیمه‌عمیق و قنوات به‌طور سالیانه ۱۴۰ میلیون مترمکعب از آب سفرهٔ زیرزمینی را تخلیه می‌کند. بر اساس اطلاعات شرکت آب منطقه‌ای استان سمنان، در سال‌های اخیر، میزان بهره‌برداری از آبخوان آبرفتی دشت گرمسار به‌شدت رو به فزونی نهاده و بنابراین آبخوان با کاهش حجم مخزن روبه‌روست.



شکل ۱. منطقهٔ مطالعه‌شدهٔ دشت گرمسار در استان سمنان

روش انجام تحقیق

در این تحقیق با مطالعهٔ موردی، تغذیهٔ مصنوعی در دشت سمنان مورد توجه قرار گرفت. برای طراحی بهینهٔ حوضچه‌های تغذیهٔ مصنوعی در گام نخست باید مکان‌های مستعد برای احداث این حوضچه‌ها در منطقهٔ مطالعه شده شناسایی شوند. سپس، در مرحلهٔ بعد بر اساس نسبت درآمد به هزینه‌ای که این حوضچه‌ها ایجاد می‌کنند، طراحی بهینهٔ حوضچه‌های تغذیهٔ مصنوعی به دست می‌آید. در ادامه، جزئیات دو مرحلهٔ اشاره‌شده به‌طور دقیق آورده می‌شود.

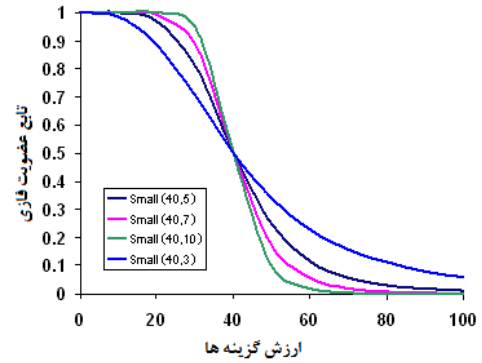
مکان‌یابی عرصه‌های اجرای طرح تغذیهٔ مصنوعی

نخستین مرحله در یک عملیات تغذیهٔ مصنوعی، مکان‌یابی مناطق مناسب برای اجرای عملیات یادشده است. به این منظور، تعیین مناطق مستعد برای تغذیهٔ آب‌های زیرزمینی اولین گام اساسی است که تا حد زیادی به وضعیت سطح زمین بستگی دارد. به‌گونه‌ای که استفاده از حوضچه‌های تغذیهٔ مصنوعی در مکان‌هایی با نفوذپذیری کم، شیب زیاد، کاربری اراضی نامناسب، فاصلهٔ زیاد از منبع آب سطحی و... نه‌تنها سبب تغییر در سطح آب زیرزمینی منطقه نمی‌شود، بلکه از نظر اقتصادی نیز مقرون‌به‌صرفه نخواهد بود. بر این اساس، تعیین مکان‌های مناسب و مستعد برای احداث حوضچه‌های تغذیه ضرورت یافته که با استفاده از داده‌های دورسنجی و تحلیل آنها در سامانهٔ اطلاعات جغرافیایی، می‌توان واحدهای نظیر شیب، مناطق دارای بافت درشت، نفوذپذیری زیاد و غیره را در سطح منطقهٔ مطالعه‌شده پیدا کرده و حتی این مناطق را بر اساس قابلیت آنها در تغذیهٔ مصنوعی آب‌های زیرزمینی طبقه‌بندی کرد.

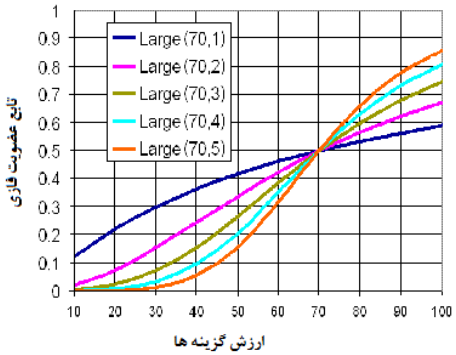
عوامل بسیاری روی مکان‌یابی حوضچه‌های تغذیهٔ مصنوعی مؤثرند. بدیهی است که استفاده از همهٔ مشخصه‌های مؤثر در مدل‌های مکان‌یابی میسر نیست. با توجه به هدفی که در این تحقیق دنبال می‌شود، از لایه‌های اطلاعاتی فاصله از رودخانه، شیب، ضخامت ناحیهٔ غیراشباع آبرفت، نفوذپذیری سطحی، زمین‌شناسی، کیفیت آب زیرزمینی، کاربری اراضی و تراکم زهکش در مطالعهٔ حاضر استفاده شد. در این تحقیق از روش‌های مختلف شامل منطق بولین، AHP و منطق فازی استفاده شده و نتایج هر یک بررسی شد. با توجه به حوضچه‌های تغذیهٔ مصنوعی احداث‌شده در منطقه به عنوان نقاط کنترل تحقیق، نتایج منطق فازی با واقعیت مطابقت بیشتری از خود نشان داد. در نهایت، در بین عملگرهای

منطق فازی شامل جمع جبری فازی و ضرب فازی و گاماهای مختلف فازی، گامای ۰/۷ فازی بهترین نتیجه را ارائه کرد. با توجه به ویژگی این عملگر مبنی بر تعدیل حساسیت بسیار زیاد عملگر ضرب جبری فازی و دقت بسیار کم عملگر جمع فازی و بر اساس نظر کارشناسان و صاحب‌نظران در امر تغذیهٔ مصنوعی، برای بررسی نهایی و مقایسهٔ نتایج، از گامای ۰/۷ استفاده شده است. با توجه تأثیر عوامل مختلف در مکان‌یابی حوضچه‌های تغذیهٔ مصنوعی و نیز وضعیت داده‌های موجود مربوط به آنها، توابع عضویتی در نظر گرفته می‌شود. توابع آماده‌ای که برای انجام این پژوهش در نظر گرفته شده sigmoidal، Trapezoidal هستند و در مواردی هم به‌صورت دستی فازی می‌شوند.

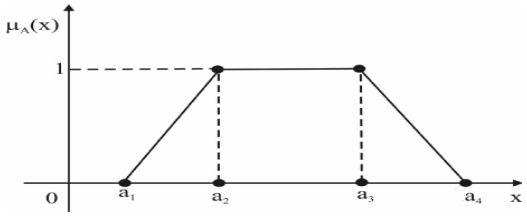
برای فازی‌کردن لایه‌ها با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS10.2.2، از توابع عضویت آمادهٔ FuzzySmall و FuzzyLarge که معرف تابع Sigmoidal هستند، استفاده خواهد شد. توابع زمانی FuzzyLarge زمانی استفاده می شوند که شاخص رابطهٔ افزایشی با هدف داشته باشند و توابع زمانی FuzzyLarge زمانی استفاده می‌شوند که شاخص رابطهٔ کاهشی با هدف داشته باشد. بر اساس مطالب گفته‌شده، نقشه‌های نفوذپذیری، ضخامت لایهٔ خشک با استفاده از تابع FuzzyLarge و نقشه‌های شیب، تراکم زهکش، کیفیت آب زیرزمینی با استفاده از تابع Sigmoidal، از طریق توابع عضویت آمادهٔ FuzzySmall در نرم‌افزار ArcGIS تهیه می‌شوند. با توجه به اینکه تأثیر لایهٔ فاصله از رودخانه در تعیین بهترین مکان در ابتدا افزایشی و در حد فاصلی حداکثر شده و درنهایت کاهشی می‌شود، بنابراین بر اساس تابع عضویت Trapezoidal تهیه می‌شود.



شکل ۲. تابع عضویت **Small** از انواع توابع **Sigmoidal**



شکل ۳. تابع عضویت **Large** از انواع توابع **Sigmoidal**



شکل ۴. شکل هندسی تابع عضویت **Trapezoidal**

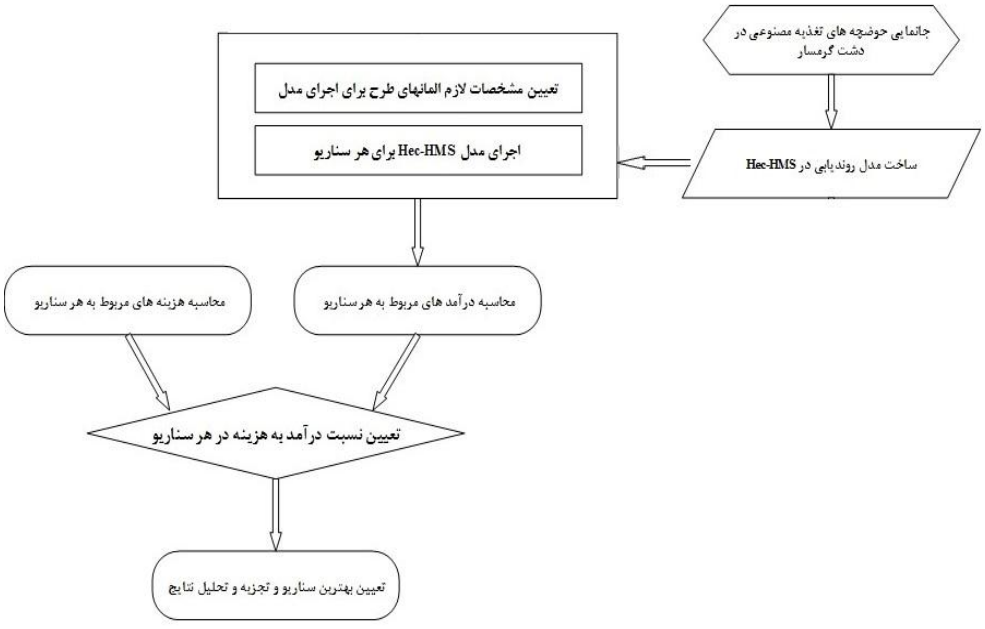
با استفاده از لایه‌های کاربری اراضی و زمین‌شناسی، که مقادیری کیفی هستند، امکان بررسی تغییرات تدریجی درجهٔ مناسبت مکان‌های مختلف وجود ندارد، بنابراین نمی‌توان از توابع آماده استفاده کرد و باید به‌صورت دستی و از طریق نرم‌افزار ArcGIS اقدام به فازی‌کردن این لایه‌ها کرد.

انتخاب گزینهٔ برتر طراحی حوضچه‌های تغذیهٔ مصنوعی

پس از تعیین مکان‌های مستعد تغذیهٔ مصنوعی از لحاظ معیارهایی که در گام نخست به آنها اشاره شد، در گام بعدی باید در این مکان‌ها حوضچه‌هایی تعبیه شود تا آب مازاد انتقال‌یافته به آنها به زمین نفوذ یابد. در این حوضچه‌ها، طراحی سازهٔ خروجی برای آنها و جانمایی

مناسب آن سبب می‌شود کـه مقـدار نفـوذ جریـان در هـر حوضچه به بیشترین حد برسد و کـارایی سیسـتم افـزایش یابد. برای رسیدن به این مهم، علاوه بر مقدار نفـوذ کـه در حقیقت درآمد اقتصادی ناشـی از تغذیـهٔ مصـنوعی اسـت، هزینه‌های ساخت هر حوضچه را نیز بایـد در نظـر گرفـت. درواقع، مسئلهٔ اصلی در اینجا به این صورت مطرح شده که در مکان‌یابی حوضچه‌ها، طراحی آنهـا و جانمـایی مناسـب سرریزهای تخلیه، باید نسبت درآمد به هزینه حداکثر شود. جانمـایی سـرریزهای تخلیـه خـود تـابعی از ارتفـاع حوضچه‌های تغذیه است و همین امر به تعریف سناریوهای متعددی در طراحی حوضچه‌ها منجـر شـده کـه خـود بـه عنوان مسئلهٔ دیگری مطرح می‌شـود. در ادامـه، حـل ایـن مسائل باید با به‌کارگیری شیوه‌های صحیح علاوه بر تعیـین مکان‌های مناسب برای تغذیهٔ آبخوان، به بهینه‌ترین حالـت طراحی حوضچه‌های تغذیه نیز با درنظرداشتن معیار درآمد به هزینه دست یافت.

بنا به آنچه گفته شد، بعد از انجام مکـان‌یـابی منـاطق مناسب برای احداث حوضچه‌های تغذیهٔ مصنوعی بر اساس روش وزن‌دهی منطق فـازی، بایـد مشخصـات بهینـه‌سـازه خروجی هر حوضـچه نیـز تعیـین شـود؛ زیـرا خصوصـیات سازه‌های قسمت خروجـی تـأثیر مسـتقیم بـر پارامترهـای روندیابی و حجم آب ذخیره‌شـده در حوضـچه‌هـای تغذیـه دارد. حالـت مطلـوب بـرای ایجـاد بیشـترین نفـوذ در هـر حوضچه آن است که جریان با کمترین سرعت حرکت کند و بعد از عبور نیز، حجم مخزن درخور توجهی شکل بگیرد. بنابراین، طراحی اجزای سازهٔ خروجی حوضچه‌های تغذیـه اهمیـت بسـزایی دارد. در تحقیـق حاضـر، سـازهٔ خروجـی حوضچه‌های تغذیه به‌صـورت یـک سـرریز در نظـر گرفتـه می‌شود. از آنجا که جریان آب از کل عـرض سـرریز عبـور خواهد کرد، تنها مؤلفهٔ تأثیرگذار بر عبور جریان از سـرریز خروجی هر حوضچه، رقوم تاج آن است. با تغییر این رقوم، حرکت جریان آب در مخزن هر حوضـچه و نیـز حجـم آب ذخیره‌شده در هر حوضچه متفاوت خواهد بود. در شـکل ۵ چارچوب تعیین بهترین گزینه برای احداث حوضـچه‌هـای تغذیهٔ مصنوعی آورده شده است.



شکل ۵. چارچوب تعیین بهترین سناریوی طراحی حوضچه‌های تغذیهٔ مصنوعی

جانمایی حوضچه‌ها

بعد از تعیین محدودهٔ احداث حوضچه‌های تغذیهٔ مصنوعی، با بررسی نقشـهٔ توپـوگرافی، بازدیـد از محـل و بـر اسـاس محدودیت‌های موجـود در محـل، جانمـایی حوضـچه‌هـای تغذیه انجام می‌شود. چگونگی چینش حوضچه‌هـا بـه ایـن صورت است که آب لازم برای تغذیـهٔ مصـنوعی از مجـرای اصلی به سمت طرح توسط کانال خاکی انتقال داده شده و وارد حوضچهٔ اول می‌شود. بعـد از ذخیـرهٔ آب در حوضـچهٔ

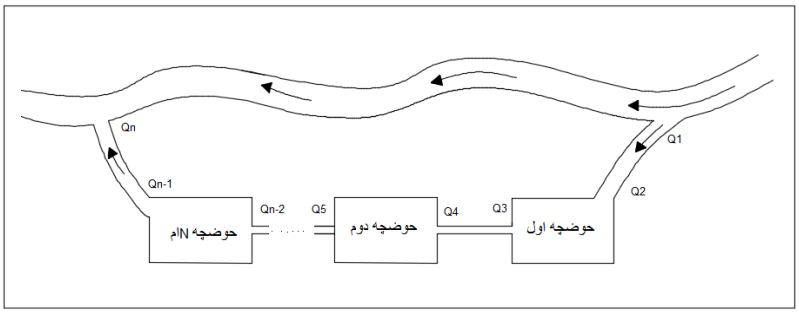
اول، آب مازاد توسط سرریز خروجی خارج شده و توسط کانال بعدی وارد حوضچهٔ دوم می‌شود. این عمل با توجه به تعداد حوضچه‌هایی که در محل تعیین می‌شود، ادامه می‌یابد و درنهایت آب مازاد از حوضچهٔ آخر خارج شده و توسط کانال انتهایی به سمت مجرای اصلی بازگردانده می‌شود. در شکل ۶، نمونه‌ای از سری حوضچه‌ها و اجزای طرح تغذیهٔ مصنوعی آورده شده است.

تابع هدف و ارائهٔ سناریو

هدف نهایی در طراحی بهینهٔ حوضچه‌های تغذیهٔ مصنوعی در تحقیق حاضر، رسیدن به حالت بهینهٔ نسبت درآمد به هزینه است. به این منظور، با تعریف سناریوهایی از ارتفاع‌های مختلف، اقدام به تعیین هزینه‌ها و درآمدهای هر سناریو می‌شود. ارتفاع ۱/۵، ۲، ۲/۵، ۳، ۳/۵ متر برای تعریف سناریو استفاده شد. درنهایت، با توجه به تابع هدف (نسبت درآمد به هزینه)، بهترین سناریو برای طراحی تعیین می شود. مشخصات سناریوهای تعریف‌شده در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱. مشخصات سناریوهای تعریف‌شده در طرح تغذیهٔ مصنوعی

تعداد حوضچهٔ طرح	ارتفاع خاکریز	سناریو
۳	۱/۵	اول
۳	۲	دوم
۳	۲/۵	سوم
۳	۳	چهارم
۳	۳/۵	پنجم



شکل ۶. چگونگی چیده‌شدن حوضچه‌ها به صورت سری

پارامتر درآمد در احداث حوضچه‌های تغذیهٔ مصنوعی شامل مقدار آب نفوذیافته به سفرهٔ آب زیرزمینی است که در ادامه به‌صورت حجم آب نفوذیافته آورده می‌شود. مقدار نفوذ شامل دو بخش می شود. بخش نخست مربوط به نفوذ هنگام عبور جریان آب است و بر اساس سرعت نفوذ اولیه بر پایهٔ آزمایش استوانهٔ مضاعف و زمان عبور جریان که با انجام روندیابی جریان در کلیهٔ حوضچه‌ها و مجاری مرتبط بین آنها محاسبه می‌شود، به دست می‌آید و بخش دوم مربوط به زمانی است که جریان عبوری تا لبهٔ سرریز فروکش می کند و فرض می‌شود که کل آب باقی‌مانده در حوضچه به سفرهٔ آب زیرزمینی نفوذ پیدا می‌کند. چگونگی محاسبهٔ مقدار درآمد بر اساس نفوذ در رابطهٔ ۱ آورده شده است.

$$Benefit = V_1 + V_2 = (I \times t) + V_2 \qquad (1)$$

که در آن، Benefit مقدار درآمد، V_1 برابر با مقدار حجم نفوذ هنگام عبور جریان آب و V_2 برابر با مقدار حجم نفوذ کل آب حوضچه، I مقدار نفوذ اولیه بر پایهٔ آزمایش استوانهٔ مضاعف و t زمان عبور جریان یا همان زمان انجام روندیابی جریان است. برای انجام روندیابی در مخازن حوضچه‌های تغذیه و مجاری بین آنها در این تحقیق از مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS استفاده می‌شود. در این مدل روندیابی در آبراهه‌ها و مجاری روباز با روش ماسکینگام-کونژ و روندیابی در مخازن تغذیه با روش پالس انجام می‌گیرد. در روش ماسکینگام-کونژ، پارامترهای θ و $\mathbf{X}$ روش ماسکینگام به مشخصات معلوم جریان و خصوصیات کانال بستگی دارد و این وابستگی به گونه‌ای تعریف شده است که مقدار دیفیوژن عددی بر میزان دیفیوژن فیزیکی موجود منطبق شود. پارامترهای $\mathbf{X}$ و θ در این روش بر اساس رابطهٔ ۲ به دست می‌آید:

$$X = ۰/۵\left(۱ - \frac{Q}{TS_o c_k \Delta x}\right). \theta = \frac{\Delta x}{C_k} \quad (۲)$$

که در آن Q دبی جریان، T عرض فوقانی جریان، S_o شیب طولی آبراهه، c_k سرعت موج سینماتیک و Δx طول بازه است [۱۰]. همچنین، برای روندیابی جریان سیلاب در مخازن حوضچه‌های تغذیه، از روش پالس استفاده می‌شود. این روش، بر تعادل بین دبی ورودی، دبی خروجی و مقدار آب ذخیره‌شده در مخزن بر اساس رابطهٔ ۳ استوار است:

$$\frac{dS}{dt} = Q_O - Q_I \quad (۳)$$

که در آن؛ S، مقدار ذخیره، Q_I، دبی ورودی و Q_O، دبی خروجی در بازهٔ زمانی dt است. پس از ورود جریان به هر حوضچه، مقداری از جریان نفوذ خواهد کرد که آن مقدار بر اساس شرایط خاک و لایه‌بندی آن تعیین می‌شود [۱۰].

میزان نفوذ از هر دبی به عنوان سری از دبی ورودی به‌صورت رابطهٔ ۴ کم می‌شود:

$$I - \phi_{In} = O_\phi \quad (۴)$$

که در آن I دبی ورودی به حوضچه و ϕ_{In} دبی نفوذ و O_ϕ دبی ذخیره‌شده در حوضچه است. درخور یادآوری است تا کامل‌شدن ذخیره‌سازی تا ارتفاع سرریز روندیابی صورت نخواهد گرفت. بعد از اتمام ذخیرهٔ یادشده روندیابی ذخیره‌ای شروع خواهد شد و دبی روندیابی‌شده در هر گام زمانی O_ϕ خواهد بود. پس از خروج آب از سرریز دوباره مرحلهٔ بعدی روندیابی در کانال و حوضچهٔ بعدی تا انتها صورت خواهد گرفت. هزینهٔ عمدهٔ حوضچه‌های تغذیه شامل هزینهٔ احداث خاکریز و سرریز هر حوضچه است که خود تابعی از تراز سرریز است. به‌وضوح مشخص است که با افزایش ارتفاع خاکریزهای حوضچه‌ها، هزینهٔ احداث آن نیز افزایش خواهد یافت. با توجه به اینکه با تغییر سناریو، حجم خاکبرداری و خاکریزی مربوط به کانال‌های انتقال نیز تغییر می‌کند، بنابراین هزینه‌های مربوط به احداث کانال‌های طرح نیز در بخش هزینه‌های کلی آورده می‌شود. هزینه‌های گفته‌شده بر اساس فهرست بهای واحد پایهٔ رشتهٔ آبیاری و زهکشی به‌صورت ریالی و به صورت رابطهٔ ۵ محاسبه خواهد شد.

$$Cost = C_۱ + C_۲ + C_۳ \quad (۵)$$

که در آن، Cost مقدار هزینه، C_1 هزینه‌های اجرای حوضچه، C_2 هزینهٔ اجرای سرریز و C_3 هزینهٔ اجرای کانال‌های طرح است.

یافته‌ها

جانمایی حوضچه‌های تغذیهٔ مصنوعی

با توجه تأثیر عوامل مختلف در مکان‌یابی حوضچه‌های تغذیهٔ مصنوعی و نیز وضعیت داده‌های موجود مربوط به آنها، توابع عضویتی در نظر گرفته شده است که در جدول ۲ آورده شده است.

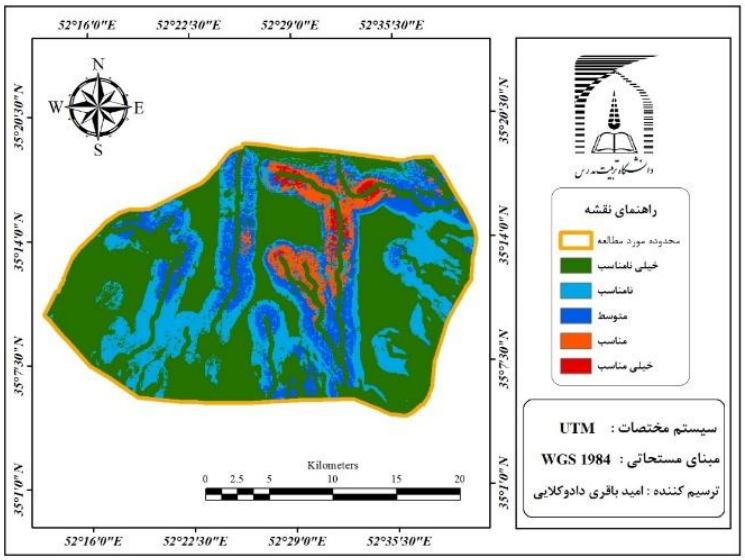
پس از تشکیل نقشه‌های مربوط به هر یک از فاکتورها، مقادیر عضویت موجود در آنها به کمک عملگرهای فازی با یکدیگر ترکیب می‌شوند [۹]. در این مرحله برای روی‌هم‌گذاری لایه‌های اطلاعاتی فازی‌سازی‌شده و به‌دست‌آوردن خروجی، بر اساس نظر کارشناسان و صاحب‌نظران در امر تغذیهٔ مصنوعی، از تابع گامای فازی ۰/۷ استفاده خواهد شد که درنهایت با اعمال این عملگرها مکان‌هایی که قابلیت تغذیهٔ مصنوعی را دارند، شناسایی می‌شود. نتیجهٔ به‌دست‌آمده از این عملگر در جدول ۳ و شکل ۷ آورده شده است:

جدول ۲. توابع عضویت هر یک از لایه‌های مکان‌یابی تغذیهٔ مصنوعی به روش منطق فازی

پارامتر	نوع تابع عضویت	Midpoint	Spread
شیب (درصد)	FuzzySmall	۴	۵
نفوذپذیری (میلی‌متر بر ساعت)	FuzzyLarge	۲۵	۵
ضخامت لایهٔ خشک (متر)	FuzzyLarge	۳۰	۵
کیفیت آب (µmhos/cm)	FuzzySmall	۲۲۵۰	۵
تراکم زهکش (Km/Km2)	FuzzySmall	۱/۴	۵

جدول ۳. نتیجهٔ به‌دست‌آمده از تلفیق نقشه‌های پایه با استفاده از عملگر گامای فازی

مقدار گاما	تناسب	مساحت (مترمربع)	مساحت (درصد)
	بسیار مناسب	۴۵۷۲۱۱۴/۴۱	۰/۸۶
	مناسب	۲۵۰۲۹۲۴۲/۶۸	۴/۷۰
۰/۷	متوسط	۷۴۵۸۰۴۸۶/۶۳	۱۴/۰۲
	نامناسب	۱۲۳۴۵۰۴۵۳/۶۱	۲۳/۲۰
	بسیار نامناسب	۳۰۴۴۴۸۱۵۸/۴۷	۵۷/۲۲

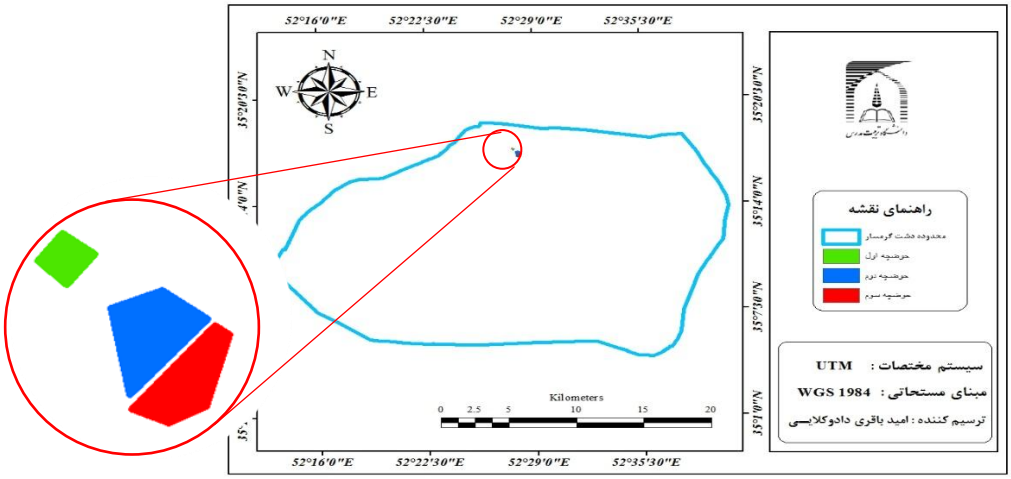


شکل ۷. نقشهٔ به‌دست‌آمده از تلفیق نقشه‌های پایه با عملگر گامای ۰/۷

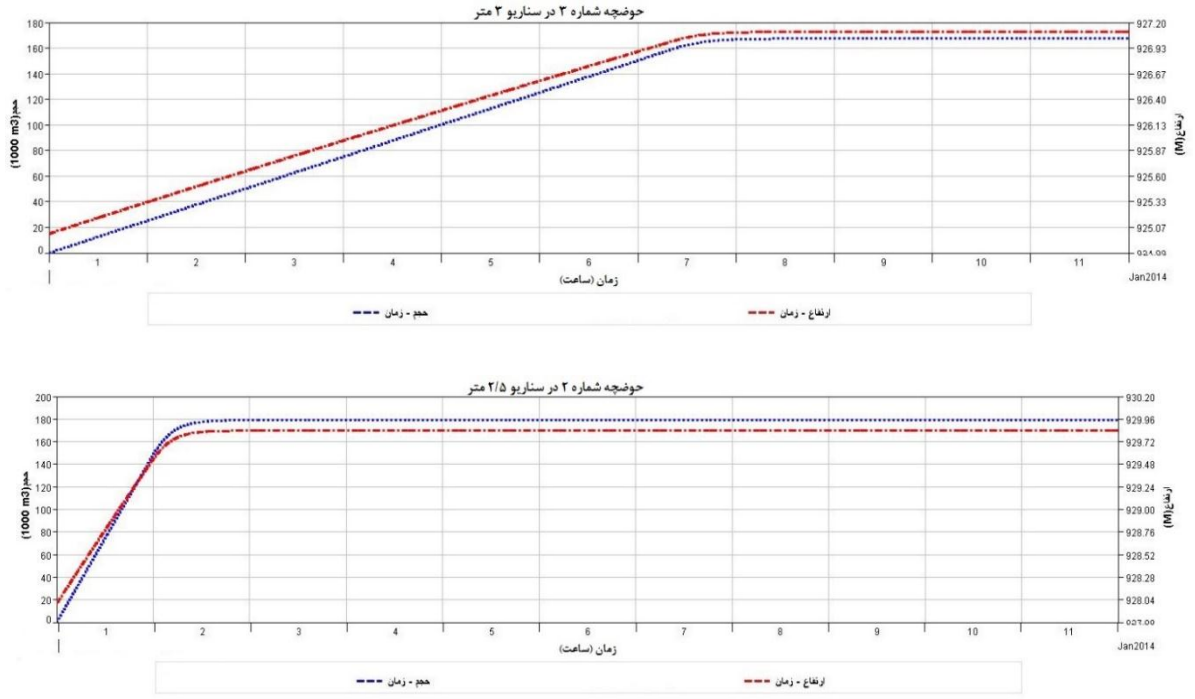
با بررسی‌های انجام‌شده از نقشهٔ مکان‌یابی محدودهٔ مناسب، نقشهٔ توپوگرافی، بازدیدهای انجام‌شده از دشت گرمسار و بر اساس محدودیت‌های موجود در محل شامل خط انتقال نیرو در قسمت شمالی، کانال انتقال آب در قسمت شرقی، کانال کوچک در قسمت جنوبی و مسیل رودخانه در قسمت غربی، جانمایی نهایی حوضچه‌های تغذیه انجام شد. درنهایت، با توجه به مسائل یادشده، سه حوضچه در ناحیهٔ مد نظر در دشت گرمسار با مساحت‌های برابر با ۲۶۷۵۱، ۹۳۸۵۷ و ۷۵۷۱۰ مترمربع در نظر گرفته شد. محل قرارگیری حوضچه‌ها در شکل ۸ نشان داده شده است.

پارامترهای درآمد و هزینه

برای انجام روندیابی جریان در طرح تغذیهٔ مصنوعی متشکل از مجموعه‌ای از حوضچه و کانال‌های مختلف، مدلی برای هر سناریو در نرم‌افزار HEC-HMS تهیه شد. این مدل شامل یک منبع ورودی، سه حوضچهٔ تغذیه و چهار کانال است. درآمد به‌دست‌آمده از احداث حوضچه‌های تغذیهٔ مصنوعی شامل مقدار آب نفوذیافته به سفرهٔ آب زیرزمینی است. نفوذنیافتن جریان آب در کانال‌های موجود در طرح تغذیه، از فرضیاتی است که در این تحقیق در نظر گرفته شده است. بر این اساس، برای محاسبهٔ نفوذ هنگام عبور جریان آب تنها نفوذ آب در حوضه‌های تغذیه در نظر گرفته می‌شود، بنابراین برای محاسبهٔ نفوذ با استفاده از سرعت نفوذ اولیه در این شرایط، از مدت‌زمانی که حجم هر حوضچه به مقدار ثابتی برسد، استفاده شده است. در شکل ۹ رابطهٔ حجم – زمان و رابطهٔ ارتفاع – زمان برای نمونه که با استفاده از نرم‌افزار HEC-HMS تهیه شد، آورده شده است.



شکل ۸. نمایی از جانمایی نهایی حوضچه‌های تغذیهٔ مصنوعی در دشت گرمسار



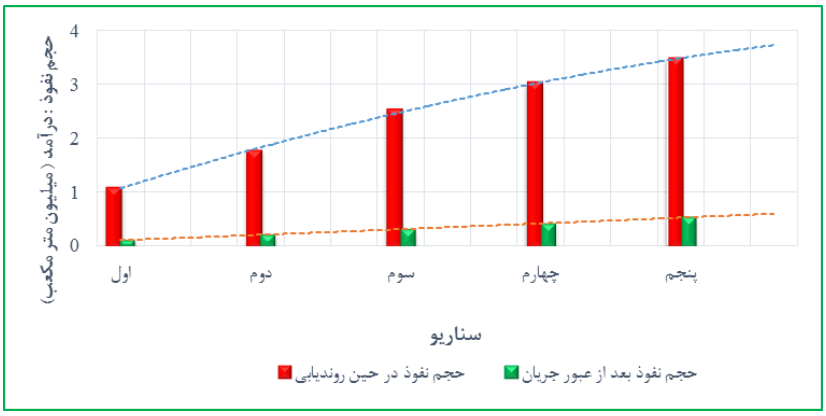
شکل ۹. دو نمونه نتیجهٔ رابطهٔ حجم - زمان و ارتفاع - زمان در حوضچه‌ها

مقدار حجم آب نفوذیافته هنگام عبور جریان آب تا پرشدن حوضچه‌ها و حجم نفوذیافته داخل مخزن بعد از عبور جریان آب در شکل ۱۰ آورده شده است.

با توجه به شکل ۱۰، حجم آب نفوذیافته هنگام عبور جریان خیلی بیشتر از حجم آبی است که بعد از عبور جریان در مخزن می‌ماند و بعد از مدتی نفوذ می‌کند. در جدول ۴ مجموع حجم آب نفوذیافته در حوضچه‌ها در هر سناریو آورده شده است. برای نمونه، هزینه‌های احداث دیوارهٔ حوضچه‌ها، که حجم درخور توجهی را شامل می‌شود، در شکل ۱۱ آورده شده است.

گزینش سناریوی مناسب

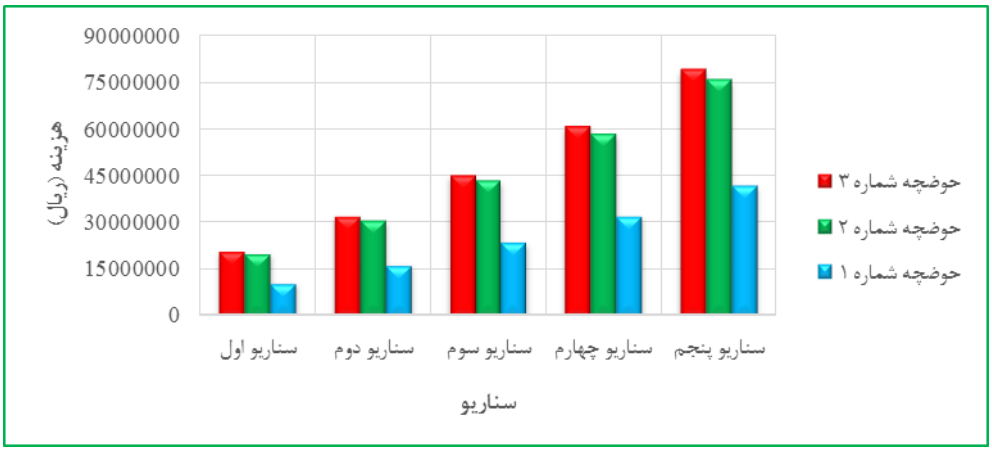
بر اساس درآمدها و هزینه‌هایی که برای همهٔ سناریوها محاسبه شد، نسبت درآمد به هزینه برحسب مترمکعب بر ریال برای همهٔ سناریوها نیز تعیین و در جدول ۵ آورده شده است.



شکل ۱۰. نمودار حجم نفوذ در سیستم تغذیهٔ مصنوعی در سناریوهای مختلف

جدول ۴. مجموع حجم آب نفوذیافته در حوضچه‌ها در هر سناریو

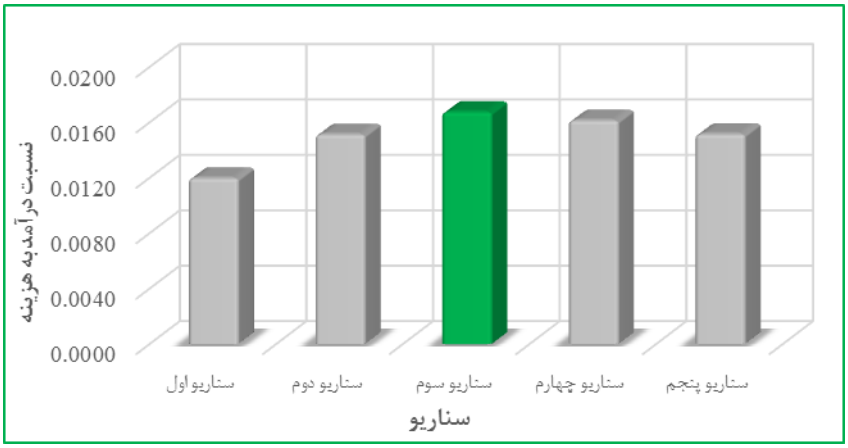
مجموع نفوذ (میلیون مترمکعب)	حجم نفوذ در بعد از روندیابی (میلیون مترمکعب)	حجم نفوذ هنگام روندیابی (میلیون مترمکعب)	سناریو	ارتفاع خاکریز (متر)
۱/۱۸	۰/۰۹	۱/۰۸	اول	۱/۵
۱/۹۸	۰/۲	۱/۷۸	دوم	۲
۲/۸۳	۰/۳	۲/۵۲	سوم	۲/۵
۳/۴۴	۰/۴۱	۳/۰۲	چهارم	۳
۴/۰	۰/۵۲	۳/۴۸	پنجم	۳/۵



شکل ۱۱. هزینهٔ احداث حوضچه‌های تغذیهٔ مصنوعی در سناریوهای مختلف

جدول ۵. مقادیر نسبت درآمد به هزینه در هر یک از سناریوها

سناریو	ارتفاع خاکریز (متر)	نسبت درآمد به هزینه
اول	۱/۵	۰/۰۱۲۰
دوم	۲	۰/۰۱۵۱
سوم	۲/۵	۰/۰۱۶۷
چهارم	۳	۰/۰۱۶۱
پنجم	۳/۵	۰/۰۱۵۲



شکل ۱۲. نمودار نسبت درآمد به هزینه در هر یک از سناریوها

همان‌طور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، سناریوی سوم که با رنگ سبز مشخص شده است، بیشترین نسبت درآمد به هزینه را دارد و بنابراین بر اساس تابع هدف درآمد به هزینه، این سناریو بهترین شرایط را برای احداث طرح تغذیهٔ مصنوعی دارد. مشخصات سناریوی سوم به عنوان سناریوی برتر در جدول ۶ آورده شده است.

علاوه بر نسبت درآمد به هزینه، می‌توان از تغییرات سناریوها بر اساس درآمد و هزینه نیز برای تحلیل و انتخاب حالت بهینه برای احداث حوضچه‌های تغذیهٔ مصنوعی نیز استفاده کرد. تغییرات سناریو شامل ۱/۵ــ ۲، ۲ـ ۲/۵، ۲/۵ـ ۳ و ۳ـ ۳/۵ برای درآمدها و هزینه‌ها در جدول ۷ و جدول ۸ آورده شده است. حالت بهینه برای تغییرات سناریو بر اساس درآمد زمانی است که تغییرات درآمد بیشترین مقدار باشد و برای تغییرات سناریو بر اساس هزینه نیز حالتی که تغییرات هزینه کمترین باشد، بهترین شرایط است.

جدول ۶. مقادیر نسبت درآمد به هزینه در سناریوی برتر

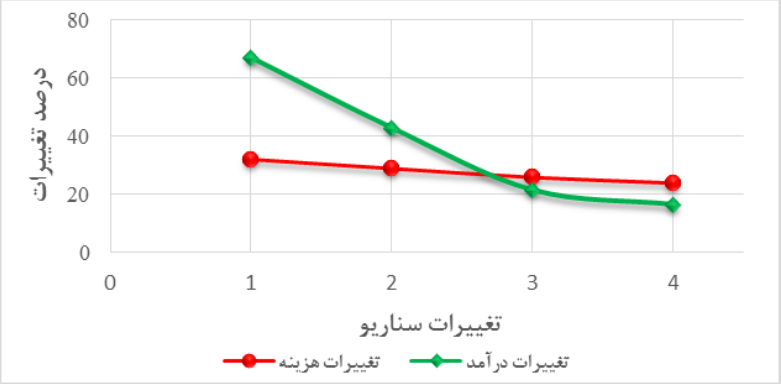
سناریو	ارتفاع (متر)	شمارهٔ حوضچه	مساحت (m^2)	تراز سرریز	حجم نفوذ نهایی هنگام عبور جریان (million m^3)	کل نفوذ آب (million m^3)
سوم	۲/۵	۱	۲۶۷۵۲/۷	۹۳۵/۵	۰/۳۹	۲/۸۳
		۲	۹۳۸۵۸/۶	۹۲۹/۵	۱/۳۱	
		۳	۷۵۷۱۱/۶	۹۲۶/۵	۰/۸	

جدول ۷. درصد تغییرات درآمد بر اساس افزایش ارتفاع

ردیف	سناریو	درصد تغییرات درآمد
۱	۱/۵ – ۲	۶۷/۰۴
۲	۲ – ۲/۵	۴۲/۹۱
۳	۲/۵ – ۳	۲۱/۵۰
۴	۳ - ۳/۵	۱۶/۵۰

جدول ۸. درصد تغییرات هزینه بر اساس افزایش ارتفاع

ردیف	سناریو	درصد تغییرات هزینه
۱	۱/۵ – ۲	۳۲/۲۴
۲	۲ – ۲/۵	۲۹/۱۲
۳	۲/۵ – ۳	۲۶/۰۶
۴	۳ - ۳/۵	۲۴/۰۹



شکل ۱۳. نمودار درصد تغییرات هزینه و درآمد بر اساس افزایش ارتفاع

در شکل ۱۳، روند تغییرات درآمد و هزینه در سناریوها، به صورت نزولی است و بر اساس جدول ۷ با افزایش ارتفاع از ۱/۵ متر به دو متر شاهد بیشترین تغییر درآمد هستیم؛ بنابراین بر اساس تغییرات درآمد سناریوی دوم یعنی ارتفاع دو متر بهترین حالت برای طرح تغذیهٔ مصنوعی است.

بحث و نتیجه‌گیری

هدف اصلی و کلی این تحقیق تعیین مناطق مناسب برای اجرای طرح تغذیهٔ مصنوعی آب زیرزمینی در بهترین حالت نسبت درآمد به هزینه است. با بررسی و تجزیه‌وتحلیل نتایج تحقیق، اراضی مناسب برای اجرای طرح تغذیهٔ مصنوعی با به‌کارگیری منطق فازی، ۰/۸۶ درصد بسیارمناسب و ۴/۷۰ درصد مناسب به دست آمد. با افزایش ارتفاع دیوارهٔ حوضچه‌ها، نسبت درآمد به هزینه افزایش یافته و در ارتفاع ۲/۵ متر بیشترین مقدار شده و در ادامه روند کاهشی به خود گرفته است. بنابراین، بر اساس تابع هدف درآمد به هزینه، سناریوی سوم یعنی ارتفاع ۲/۵ متر بهترین شرایط را برای احداث طرح تغذیهٔ مصنوعی دارد. در این سناریو حجم حوضچهٔ اول ۰/۳۹، حوضچهٔ دوم ۱/۳۱ و حوضچهٔ سوم ۰/۸ میلیون مترمکعب بود که کل نفوذ آب در حوضچه‌ها برابر با ۲/۸۳ میلیون مترمکعب به دست آمد. بر اساس پارامتر تغییرات سناریوها، مشاهده شد که روند تغییرات درآمد و هزینه در سناریوها، به صورت نزولی بوده و با افزایش ارتفاع از ۱/۵ متر به دو متر شاهد بیشترین تغییر درآمد بوده‌ایم. بنابراین، بر اساس تغییرات درآمد سناریوی دوم یعنی ارتفاع دو متر بهترین حالت برای طرح تغذیهٔ مصنوعی انتخاب شد.

در نگاهی کلی‌تر به تحقیق، با توجه به مطالعات صورت‌گرفته و گزارش‌های موجود، در صورت تغذیه آبی معادل ۲۹/۰۲ میلیون مترمکعب به درون آبخوان، میزان آب تغذیه‌شده به آبخوان معادل آب تخلیه‌شده از آن خواهد بود. به بیانی دیگر، سفره به حالت تعادل خواهد رسید. از طرفی، بر اساس آمار موجود و میانگین آورد حجم سالیانهٔ رودخانهٔ حبله‌رود، ۳۲/۴۳ میلیون مترمکعب در سال از آب رودخانه به‌صورت مازاد از محدوده خارج می‌شود که بخش عمده‌ای از آن به‌صورت سیلابی است. بنابراین، با توجه به کاهش حجم سالانهٔ ۲۹/۰۲ میلیون مترمکعب در مخزن، می‌توان با تغذیهٔ ۸۹/۴۷ درصد از آب مازاد موجود سفره را به حالت تعادل رساند و از افت سطح پتانسیل و کاهش حجم مخزن در آبخوان دشت گرمسار جلوگیری کرد. با توجه به مطالب گفته‌شده در زمینهٔ بیلان دشت، در شرایط تزریق ۲۴ ساعت و در مدت یک سال، به ۰/۹۲ مترمکعب بر ثانیه آب برای تغذیه نیاز است. بنابراین، با توجه به دبی ورودی چهار مترمکعب بر ثانیه در شرایط پرآبی و بر اساس روندیابی جریان در حوضچه‌ها، ۳/۷۱ مترمکعب آب برای تغذیهٔ آب زیرزمینی نفوذ می‌یابد. بر این اساس، می‌توان برنامهٔ زمانی برای عملیات تغذیه در طرح تغذیهٔ مصنوعی پیشنهاد کرد. بنابراین، می‌توان به عنوان برنامهٔ زمان‌بندی، سیستم تغذیهٔ مصنوعی به مدت یک فصل در سال و یا شش ساعت از ۲۴ ساعت در یک سال و یا ۱۲ ساعت در شش ماه که آب مورد نیاز تأمین شده باشد، عمل تغذیه را انجام داد.

منابع

[1].Mohan G. Ravi Shankar MN. A GIS based hydro geomorphic approach for identifications of site-specific artificial-recharge techniques in the Deccan Volcanic Province. J of Earth System Science. 2005;114(5):505-514.

[2].Chowdhury A, Jha K, Chowdury M. Delineation of groundwater recharge zones and identification of artificial recharge sites in west Medinipur district, West Bengal, using RS & GIS and MCDM techniques. Environmental Erath Science. 2010;59:1209-1222.

[3].Rahman, MA. Rusteberg B. Gogu RC. Lobo Ferreira JP. Sauter M. A new spatial multi-criteria decision support tool for site selection for implementation of managed aquifer recharge. J of Environmental Management, 2012;99:61-75.

[4].Khadija G. Makram A. Salah J. Geospatial and AHP-multicriteria analyses to locate and rank suitable sites for groundwater recharge with reclaimed water. J Resources Conservation and Recycling. 2015;104:19-30.

[5].Seif A, Solhi S, Erfan M, Solhi M. Determining the appropriate region for artificial recharge of Rafsengan basin aquifer using TOPSIS methods in GIS environment Case Study: Hydrological Rafsanjan Basin. J of Human Geography. 2013;(2):55-76. [Persian]

[6].Nasimi A, Zare M. Site Selection of Basins for Artificial Recharge of Groundwater in Boushkan Catchment based on Analytical Hierarchical Process (AHP). J of Water and Soil science. 2015:25(1);125-141. [Persian]

[7].Rahimi, S. Shadman Roodposhti M. Using combined AHP–genetic algorithm in artificial groundwater recharge site selection of Gareh Bygone Plain. Iran J Environ Earth. 2014;72:1979-1992.

[8].Sabokbar HA, Nasiri H, Hamze M, Talebi S, Rafiei Y. Identification of suitable areas for artificial groundwater recharge using integrated ANP and pair wise comparison methods in GIS environment, (case study: Garbaygan Plain of Fasa). J of Geography and Environmental Planning. 2012;44(4):143-146. [Persian]

[9].Beheshtifar, S. Sadi mesgar M. Using fuzzy logic in GIS environment for site selection of gas. J of Civil and Surveying Engineering. 2011 4: 583- 595. [Persian]

[10]. Chow, VT. Handbook of Applied Hydrology, McGraw-Hill, New York, NY. 1964.