

## تعیین بهینه‌ترین حالت طراحی و اجرای حوضچه‌های تغذیه مصنوعی

امید باقری دادوکلائی<sup>۱</sup>، جمال محدودلی سامانی<sup>۲</sup>، جواد سروریان<sup>۳\*</sup>

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

۲. استاد، گروه سازه‌های آبی دانشکده 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 تغذیه مصنوعی به‌عنوان راهکاری برای جبران این مشکل، اهمیت زیادی دارد. هدف از این تحقیق در مرحله اول، مکان‌یابی حوضچه‌های تغذیه مصنوعی با استفاده از روش منطق فازی و در مرحله بعد انتخاب گزینه برتر طراحی این حوضچه‌هاست. برای انتخاب گزینه برتر به منظور طراحی حوضچه‌های تغذیه مصنوعی از نسبت درآمد به هزینه 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. هزینه هر یک از سناریوها نیز بر اساس مصالح به‌کاررفته و سایر پارامترها محاسبه شد. نتایج نشان داد اراضی مناسب برای اجرای طرح تغذیه مصنوعی با به‌کارگیری منطق فازی ۰/۸۶ درصد بسیار مناسب و ۴/۷۰ درصد مناسب تشخیص داده شد. برای انتخاب گزینه 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 تغذیه مصنوعی را دارد.

**کلیدواژگان:** آب‌های زیرزمینی، تغذیه مصنوعی، حوضچه‌های تغذیه، طراحی بهینه حوضچه‌ها، منطق فازی.

## 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، تخلیه آب‌های زیرزمینی و جایگزین نشدن 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. تغذیه مصنوعی یکی از روش‌هایی است که می‌تواند بخشی از آب خارج شده از زیر زمین را جایگزین کند و یکی از روش‌های مناسب برای مهار و استفاده بهینه از سیلاب در مناطق خشک و نیمه‌خشک به‌شمار می‌رود [۱].

نخستین مرحله در عملیات تغذیه 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 از جمله 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 تغذیه مصنوعی آب‌های زیرزمینی را در منطقه مدیناپور غربی تعیین کردند. نتایج تحقیق آنها بیان‌کننده کارایی تکنیک‌های MCDM در تلفیق با GIS در تعیین مناطق مناسب برای تغذیه مصنوعی آب‌های زیرزمینی است [۲]. راحمان و همکارانش توانستند با استفاده از روش‌های WLC و قانون تصمیم‌گیری OWA محل‌های مناسب تغذیه مصنوعی را به‌خوبی مشخص کنند و به نتایج خوبی برسند [۳]. خدیجا و همکارانش تحقیقی را برای توسعه روشی برای استقرار و رتبه‌بندی مکان‌های مناسب برای تغذیه مصنوعی آب‌های زیرزمینی با استفاده از آب‌باز یافت‌شده حاصل از تصفیه فاضلاب انجام دادند. هفت محدودیت برای شناسایی مناطق مناسب برای تغذیه آبخوان انتخاب شدند. برای رتبه‌بندی سه معیار اصلی، جنبه‌های فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی شناسایی شد که از آنها نیز ۱۲ زیرمعیار به دست آوردند. همه این معیارها در یک ساختار سیستم سلسله‌مراتبی قرار داده شده و ماتریس مقایسه زوجی برای آنها تهیه شد. در نهایت، چهار منطقه را برای استقرار حوضچه‌های تغذیه 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 تغذیه مصنوعی حوضه آبخیز بوشکان استفاده کردند [۶]. در نهایت، سه منطقه آبرفتی برای تغذیه مصنوعی با اهداف کوتاه‌مدت و یک منطقه آبرفتی برای تغذیه مصنوعی با اهداف بلندمدت انتخاب کردند. سیف و همکارانش به کمک روش TOPSIS و با استفاده از ۱۳ پارامتر مؤثر مطالعه خود را بر حوضه آبی رفسنجان انجام دادند. در ادامه تحقیق بر اساس عامل ارتفاع حوضه آبی رفسنجان را به شش منطقه جداگانه تقسیم کردند. این شش منطقه را بر اساس مدل تاپسیس ارزیابی کرده و در نهایت اولویت این شش منطقه را از نظر تغذیه 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 تغذیه مصنوعی مطالعه کردند. آنها از ترکیب روش تحلیل سلسله‌مراتبی و الگوریتم ژنتیک برای وزن‌دهی استفاده کردند [۷]. فرجی سبکبار و همکارانش بر پایه تلفیق روش‌های ANP و مقایسه زوجی در محیط GIS و با در نظر گرفتن هشت پارامتر تأثیرگذار شیب، کیفیت آب، زمین‌شناسی، کاربری اراضی، قابلیت انتقال، ژئومورفولوژی و تراکم زهکشی به تعیین عرصه‌های مناسب برای تغذیه مصنوعی در دشت گره بایگان فسا پرداختند [۸]. همان‌طور که اشاره شد، در زمینه مکان‌یابی مناطق مناسب برای تغذیه مصنوعی آب زیرزمینی، تحقیقات زیادی انجام شده است که بیشتر روی انتخاب پارامترهای مختلف و تعیین مناطق مستعد برای امر تغذیه مصنوعی متمرکز شده‌اند. در این تحقیق علاوه بر مکان‌یابی حوضچه‌های تغذیه مصنوعی با استفاده از روش منطق فازی، بحث طراحی بهینه این حوضچه‌ها نیز در نظر گرفته شده است.

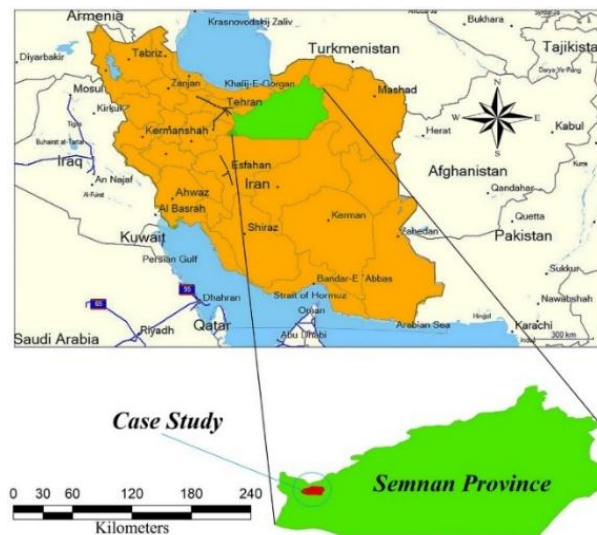
## مواد و روش‌ها

## منطقه مطالعه شده

محدوده مطالعه شده به مساحت ۵۳۳/۵ کیلومتر مربع قسمتی از دشت گرمسار واقع در استان سمنان است که در محدوده  $52^{\circ}14'23''$  تا  $52^{\circ}36'45''$  طول شرقی و  $35^{\circ}05'46''$  تا  $35^{\circ}17'32''$  عرض شمالی قرار دارد و توسط رودخانه حبله‌رود تغذیه می‌شود (شکل ۱). این

سال‌های اخیر، میزان بهره‌برداری از آبخوان آبرفتی دشت گرمسار به شدت رو به فزونی نهاده و بنابراین آبخوان با کاهش حجم مخزن روبه‌روست.

دشت آبخوان نسبتاً مناسبی دارد که توسط چاه‌های عمیق و نیمه‌عمیق و قنات به‌طور سالیانه ۱۴۰ میلیون مترمکعب از آب سفره زیرزمینی را تخلیه می‌کند. بر اساس اطلاعات شرکت آب منطقه‌ای استان سمنان، در



شکل ۱. منطقه مطالعه‌شده دشت گرمسار در استان سمنان

اساس، تعیین مکان‌های مناسب و مستعد برای احداث حوضچه‌های تغذیه ضرورت یافته که با استفاده از داده‌های دورسنجی و تحلیل آنها در سامانه اطلاعات جغرافیایی، می‌توان واحدهای نظیر شیب، مناطق دارای بافت درشت، نفوذپذیری زیاد و غیره را در سطح منطقه مطالعه‌شده پیدا کرده و حتی این مناطق را بر اساس قابلیت آنها در تغذیه مصنوعی آب‌های زیرزمینی طبقه‌بندی کرد.

عوامل بسیاری روی مکان‌یابی حوضچه‌های تغذیه مصنوعی مؤثرند. بدیهی است که استفاده از همه 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 ناحیه غیراشباع آبرفت، نفوذپذیری سطحی، زمین‌شناسی، کیفیت آب زیرزمینی، کاربری اراضی و تراکم زهکش در مطالعه 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 تغذیه 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

#### روش انجام تحقیق

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

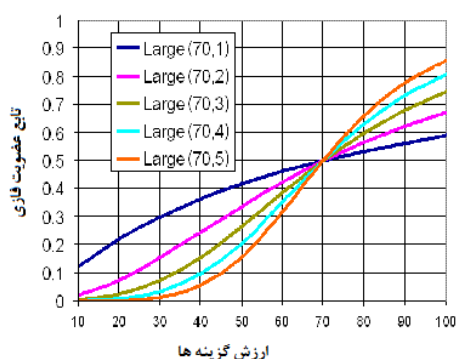
#### مکان‌یابی عرصه‌های اجرای طرح تغذیه مصنوعی

نخستین مرحله در یک عملیات تغذیه مصنوعی، مکان‌یابی مناطق مناسب برای اجرای عملیات یادشده است. به این منظور، تعیین مناطق مستعد برای تغذیه آب‌های زیرزمینی اولین گام اساسی است که تا حد زیادی به وضعیت سطح زمین بستگی دارد. به‌گونه‌ای که استفاده از حوضچه‌های تغذیه مصنوعی در مکان‌هایی با نفوذپذیری کم، شیب زیاد، کاربری اراضی نامناسب، فاصله زیاد از منبع آب سطحی و... نه تنها سبب تغییر در سطح آب زیرزمینی منطقه نمی‌شود، بلکه از نظر اقتصادی نیز مقرون‌به‌صرفه نخواهد بود. بر این

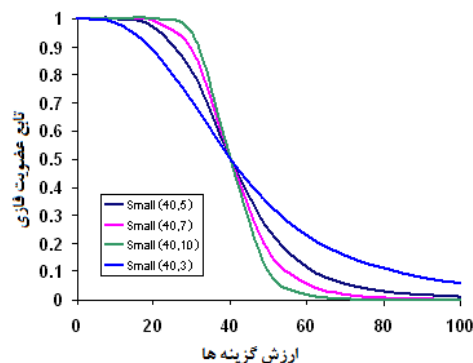
FuzzyLarge که معرف تابع Sigmoidal هستند، استفاده خواهد شد. توابع زمانی FuzzyLarge زمانی استفاده می شوند که شاخص رابطه افزایشی با هدف داشته باشند و توابع زمانی FuzzyLarge زمانی استفاده می شوند که شاخص رابطه کاهشی با هدف داشته باشد. بر اساس مطالب گفته شده، نقشه های نفوذپذیری، ضخامت لایه خشک با استفاده از تابع FuzzyLarge و نقشه های شیب، تراکم زهکش، کیفیت آب زیرزمینی با استفاده از تابع Sigmoidal از طریق توابع عضویت آماده ArcGIS در نرم افزار ArcGIS تهیه می شوند. با توجه به اینکه تأثیر لایه فاصله از رودخانه در تعیین بهترین مکان در ابتدا افزایشی و در حد فاصلی حداکثر شده و در نهایت کاهشی می شود، بنابراین بر اساس تابع عضویت Trapezoidal تهیه می شود.

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 صاحب نظران در امر تغذیه مصنوعی، برای بررسی نهایی و مقایسه نتایج، از گامای ۰/۷ استفاده شده است. با توجه تأثیر عوامل مختلف در مکان یابی حوضچه های تغذیه مصنوعی و نیز وضعیت داده های موجود مربوط به آنها، توابع عضویتی در نظر گرفته می شود. توابع آماده ای که برای انجام این پژوهش در نظر گرفته شده Sigmoidal، Trapezoidal هستند و در مواردی هم به صورت دستی فازی می شوند.

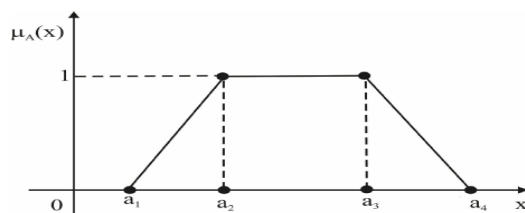
برای فازی کردن لایه ها با استفاده از نرم افزار ArcGIS 10.2.2، از توابع عضویت آماده FuzzySmall و



شکل ۳. تابع عضویت Large از انواع توابع Sigmoidal



شکل ۲. تابع عضویت Small از انواع توابع Sigmoidal



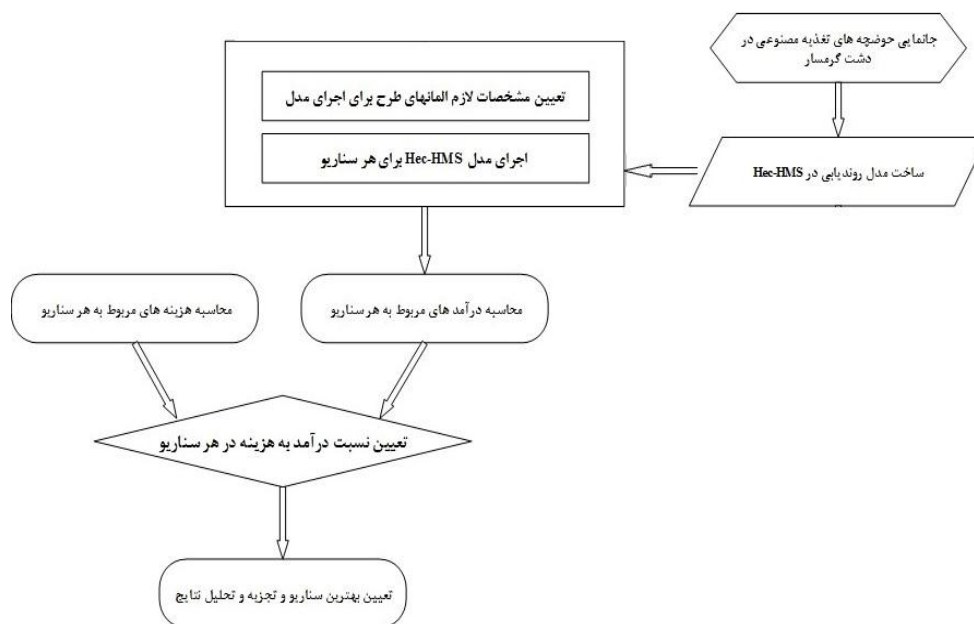
شکل ۴. شکل هندسی تابع عضویت Trapezoidal

انتخاب گزینه برتر طراحی حوضچه های تغذیه مصنوعی پس از تعیین مکان های مستعد تغذیه مصنوعی از لحاظ معیارهایی که در گام نخست به آنها اشاره شد، در گام بعدی باید در این مکان ها حوضچه هایی تعبیه شود تا آب مازاد انتقال یافته به آنها به زمین نفوذ یابد. در این حوضچه ها، طراحی سازه خروجی برای آنها و جانمایی

با استفاده از لایه های کاربری اراضی و زمین شناسی، که مقادیری کیفی هستند، امکان بررسی تغییرات تدریجی درجه مناسب مکان های مختلف وجود ندارد، بنابراین نمی توان از توابع آماده استفاده کرد و باید به صورت دستی و از طریق نرم افزار ArcGIS اقدام به فازی کردن این لایه ها کرد.

روش وزن‌دهی منطق فازی، باید مشخصات بهینه‌سازه خروجی هر حوضچه نیز تعیین شود؛ زیرا خصوصیات سازه‌های قسمت خروجی تأثیر مستقیم بر پارامترهای روندیابی و حجم آب ذخیره‌شده در حوضچه‌های تغذیه دارد. حالت مطلوب برای ایجاد بیشترین نفوذ در هر حوضچه آن است که جریان با کمترین سرعت حرکت کند و بعد از عبور نیز، حجم مخزن درخور توجهی شکل بگیرد. بنابراین، طراحی اجزای سازه خروجی حوضچه‌های تغذیه اهمیت بسزایی دارد. در تحقیق حاضر، سازه خروجی حوضچه‌های تغذیه به صورت یک سرریز در نظر گرفته می‌شود. از آنجا که جریان آب از کل عرض سرریز عبور خواهد کرد، تنها مؤلفه تأثیرگذار بر عبور جریان از سرریز خروجی هر حوضچه، رقوم تاج آن است. با تغییر این رقوم، حرکت جریان آب در مخزن هر حوضچه و نیز حجم آب ذخیره‌شده در هر حوضچه متفاوت خواهد بود. در شکل ۵ چارچوب تعیین بهترین گزینه برای احداث حوضچه‌های تغذیه مصنوعی آورده شده است.

مناسب آن سبب می‌شود که مقدار نفوذ جریان در هر حوضچه به بیشترین حد برسد و کارایی سیستم افزایش یابد. برای رسیدن به این مهم، علاوه بر مقدار نفوذ که در حقیقت درآمد اقتصادی ناشی از تغذیه مصنوعی است، هزینه‌های ساخت هر حوضچه را نیز باید در نظر گرفت. در واقع، مسئله اصلی در اینجا به این صورت مطرح شده که در مکان‌یابی حوضچه‌ها، طراحی آنها و جانمایی مناسب سرریزهای تخلیه، باید نسبت درآمد به هزینه حداکثر شود. جانمایی سرریزهای تخلیه خود تابعی از ارتفاع حوضچه‌های تغذیه است و همین امر به تعریف سناریوهای متعددی در طراحی حوضچه‌ها منجر شده که خود به عنوان مسئله دیگری مطرح می‌شود. در ادامه، حل این مسائل باید با به کارگیری شیوه‌های صحیح علاوه بر تعیین مکان‌های مناسب برای تغذیه آبخوان، به بهینه‌ترین حالت طراحی حوضچه‌های تغذیه نیز با در نظر داشتن معیار درآمد به هزینه دست یافت. بنا به آنچه گفته شد، بعد از انجام مکان‌یابی مناطق مناسب برای احداث حوضچه‌های تغذیه مصنوعی بر اساس



شکل ۵. چارچوب تعیین بهترین سناریوی طراحی حوضچه‌های تغذیه مصنوعی

تغذیه انجام می‌شود. چگونگی چینش حوضچه‌ها به این صورت است که آب لازم برای تغذیه مصنوعی از مجرای اصلی به سمت طرح توسط کانال خاکی انتقال داده شده و وارد حوضچه اول می‌شود. بعد از ذخیره آب در حوضچه

جانمایی حوضچه‌ها بعد از تعیین محدوده احداث حوضچه‌های تغذیه مصنوعی، با بررسی نقشه توپوگرافی، بازدید از محل و بر اساس محدودیت‌های موجود در محل، جانمایی حوضچه‌های

تعریف سناریو استفاده شد. در نهایت، با توجه به تابع هدف (نسبت درآمد به هزینه)، بهترین سناریو برای طراحی تعیین می شود. مشخصات سناریوهای تعریف شده در جدول ۱ آورده شده است.

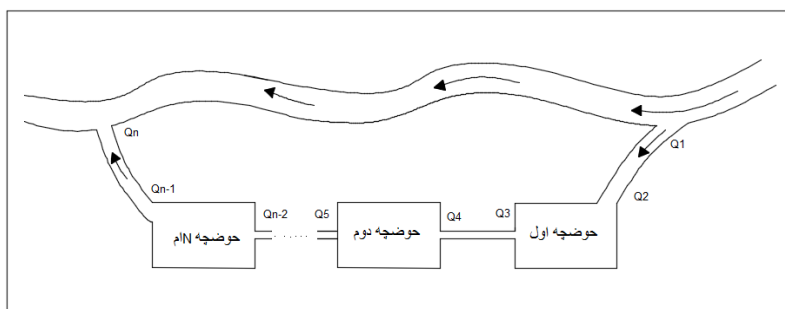
جدول ۱. مشخصات سناریوهای تعریف شده در طرح تغذیه مصنوعی

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

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

#### تابع هدف و ارائه سناریو

هدف نهایی در طراحی بهینه حوضچه‌های تغذیه مصنوعی در تحقیق حاضر، رسیدن به حالت بهینه نسبت درآمد به هزینه است. به این منظور، با تعریف سناریوهایی از ارتفاع‌های مختلف، اقدام به تعیین هزینه‌ها و درآمدهای هر سناریو می شود. ارتفاع ۱/۵، ۲، ۲/۵، ۳، ۳/۵ متر برای



شکل ۶. چگونگی چیده شدن حوضچه‌ها به صورت سری

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 پایه آزمایش استوانه 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 می شود. در این مدل روندیابی در آبراهه‌ها و مجاری روباز با روش ماسکینگام-کونژ و روندیابی در مخازن تغذیه با روش پالس انجام می گیرد. در روش ماسکینگام-کونژ، پارامترهای  $\theta$  و  $X$  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  $X$  و  $\theta$  در این روش بر اساس رابطه ۲ به دست می آید:

پارامتر درآمد در احداث حوضچه‌های تغذیه مصنوعی شامل مقدار آب نفوذ یافته به سفره آب زیرزمینی است که در ادامه به صورت حجم آب نفوذ یافته آورده می شود. مقدار نفوذ شامل دو بخش می شود. بخش نخست مربوط به نفوذ هنگام عبور جریان آب است و بر اساس سرعت نفوذ اولیه بر پایه آزمایش استوانه مضاعف و زمان عبور جریان که با انجام روندیابی جریان در کلیه حوضچه‌ها و مجاری مرتبط بین آنها محاسبه می شود، به دست می آید و بخش دوم مربوط به زمانی است که جریان عبوری تا لبه سرریز فروکش می کند و فرض می شود که کل آب باقی مانده در حوضچه به سفره آب زیرزمینی نفوذ پیدا می کند. چگونگی محاسبه مقدار درآمد بر اساس نفوذ در رابطه ۱ آورده شده است.

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

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 پایه رشته آبیاری و زهکشی به صورت ریالی و به صورت رابطه ۵ محاسبه خواهد شد.

$$Cost = C_1 + C_2 + C_3 \quad (5)$$

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

### یافته‌ها

#### جانمایی حوضچه‌های تغذیه مصنوعی

با توجه تأثیر عوامل مختلف در مکان‌یابی حوضچه‌های تغذیه 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 روی هم‌گذاری لایه‌های اطلاعاتی فازی‌سازی شده و به دست آوردن خروجی، بر اساس نظر کارشناسان و صاحب نظران در امر تغذیه مصنوعی، از تابع گامای فازی ۰/۷ استفاده خواهد شد که در نهایت با اعمال این عملگرها مکان‌هایی که قابلیت تغذیه مصنوعی را دارند، شناسایی می‌شود. نتیجه به دست آمده از این عملگر در جدول ۳ و شکل ۷ آورده شده است:

$$X = 0.5 \left( 1 - \frac{Q}{TS_0 c_k \Delta x} \right), \theta = \frac{\Delta x}{C_k} \quad (2)$$

که در آن  $Q$  دبی جریان،  $T$  عرض فوقانی جریان،  $S_0$  شیب طولی آبراهه،  $C_k$  سرعت موج سینماتیک و  $\Delta x$  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 رابطه ۳ استوار است:

$$\frac{dS}{dt} = Q_0 - Q_1 \quad (3)$$

که در آن  $S$  مقدار ذخیره،  $Q_1$  دبی ورودی و  $Q_0$  دبی خروجی در بازه 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 به صورت رابطه ۴ کم می‌شود:

$$I - \phi_m = O_\phi \quad (4)$$

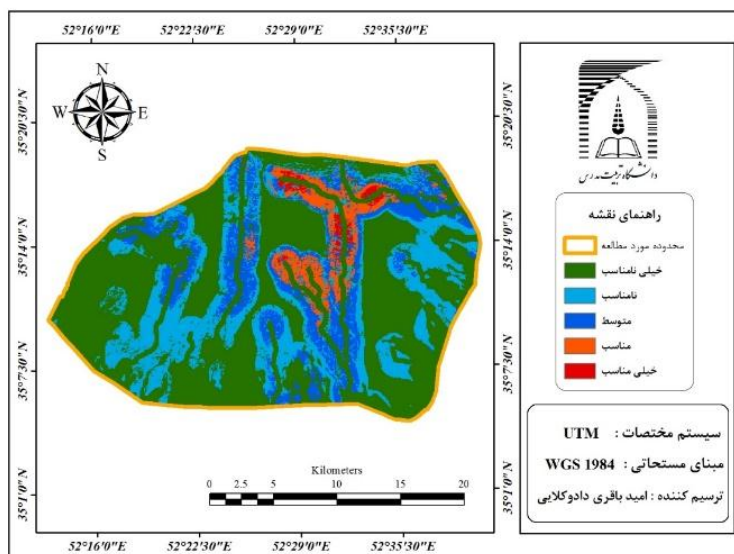
که در آن  $I$  دبی ورودی به حوضچه و  $\phi_m$  دبی نفوذ و  $O_\phi$  دبی ذخیره‌شده در حوضچه است. در خور یادآوری است تا کامل شدن ذخیره‌سازی تا ارتفاع سرریز روندیابی صورت نخواهد گرفت. بعد از اتمام ذخیره یادشده روندیابی ذخیره‌ای شروع خواهد شد و دبی روندیابی شده در هر گام زمانی  $O_\phi$  خواهد بود. پس از خروج آب از سرریز دوباره مرحله بعدی روندیابی در کانال و حوضچه بعدی تا انتها صورت خواهد گرفت. هزینه عمده حوضچه‌های تغذیه شامل هزینه احداث خاک‌ریز و سرریز هر حوضچه است که خود تابعی از تراز سرریز است. به وضوح مشخص است که با افزایش ارتفاع خاک‌ریزهای حوضچه‌ها، هزینه احداث آن

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

پارامتر	نوع تابع عضویت	Midpoint	Spread
شیب (درصد)	FuzzySmall	۴	۵
نفوذپذیری (میلی‌متر بر ساعت)	FuzzyLarge	۲۵	۵
ضخامت لایه خشک (متر)	FuzzyLarge	۳۰	۵
کیفیت آب ( $\mu\text{mhos/cm}$ )	FuzzySmall	۲۲۵۰	۵
تراکم زهکش ( $\text{Km/Km}^2$ )	FuzzySmall	۱/۴	۵

جدول ۳. نتیجه به دست آمده 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. نقشه به دست آمده از تلفیق نقشه‌های پایه با عملگر گامای ۰/۷

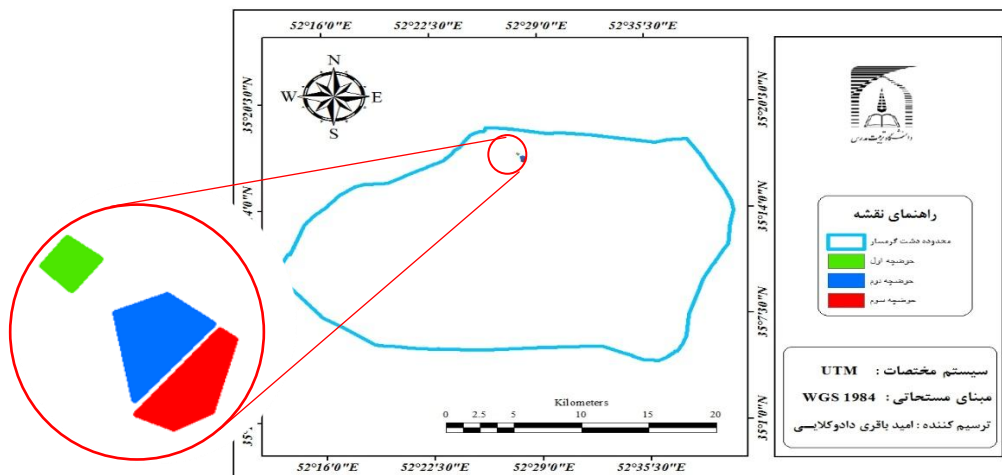
مدلی برای هر سناریو در نرم‌افزار HEC-HMS تهیه شد. این مدل شامل یک منبع ورودی، سه حوضچه تغذیه و چهار کانال است. درآمد به دست آمده از احداث حوضچه‌های تغذیه مصنوعی شامل مقدار آب نفوذ یافته به سفره آب زیرزمینی است. نفوذ نیافتن جریان آب در کانال‌های موجود در طرح تغذیه، از فرضیاتی است که در این تحقیق در نظر گرفته شده است. بر این اساس، برای محاسبه نفوذ هنگام عبور جریان آب تنها نفوذ آب در حوضه‌های تغذیه در نظر گرفته می‌شود، بنابراین برای محاسبه نفوذ با استفاده از سرعت نفوذ اولیه در این شرایط، از مدت زمانی که حجم هر حوضچه به مقدار ثابتی برسد، استفاده شده است. در شکل ۹ رابطه حجم - زمان و رابطه ارتفاع - زمان برای نمونه که با استفاده از نرم‌افزار HEC-HMS تهیه شد، آورده شده است.

با بررسی‌های انجام شده از نقشه مکان‌یابی محدوده مناسب، نقشه توپوگرافی، بازدیدهای انجام شده 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. در نهایت، با توجه به مسائل یاد شده، سه حوضچه در ناحیه 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.

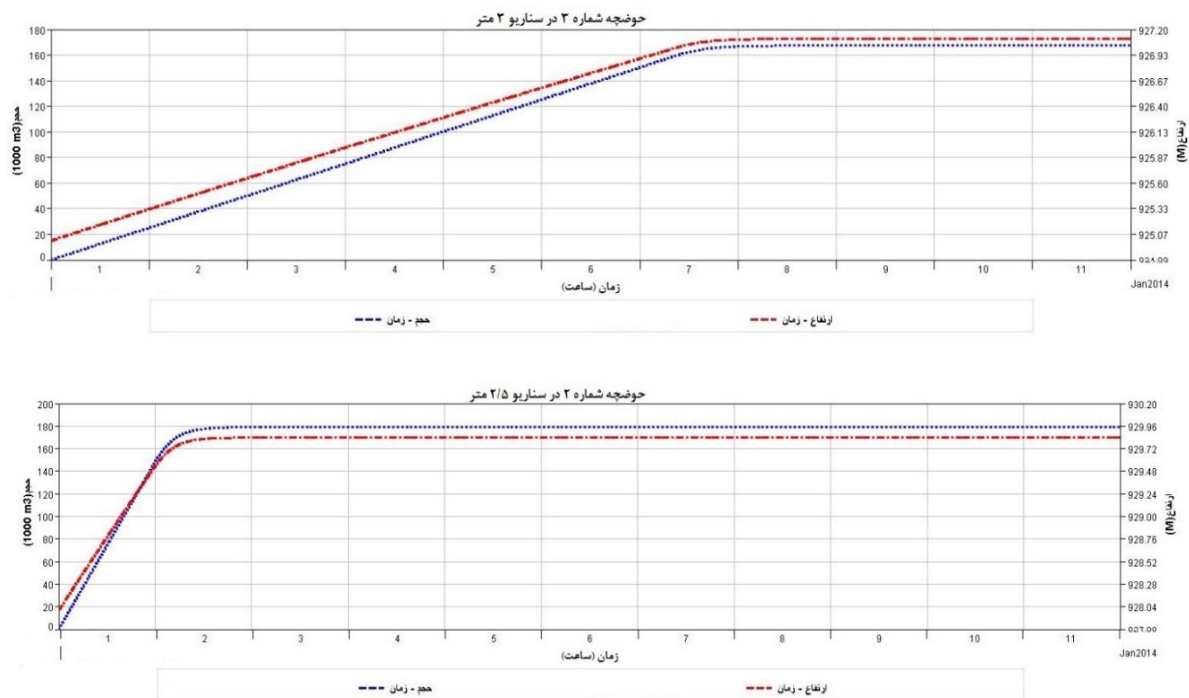
#### پارامترهای درآمد و هزینه

برای انجام روندیابی جریان در طرح تغذیه مصنوعی متشکل از مجموعه‌ای از حوضچه و کانال‌های مختلف،





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



شکل ۹. دو نمونه نتیجه رابطه حجم - زمان و ارتفاع - زمان در حوضچه‌ها

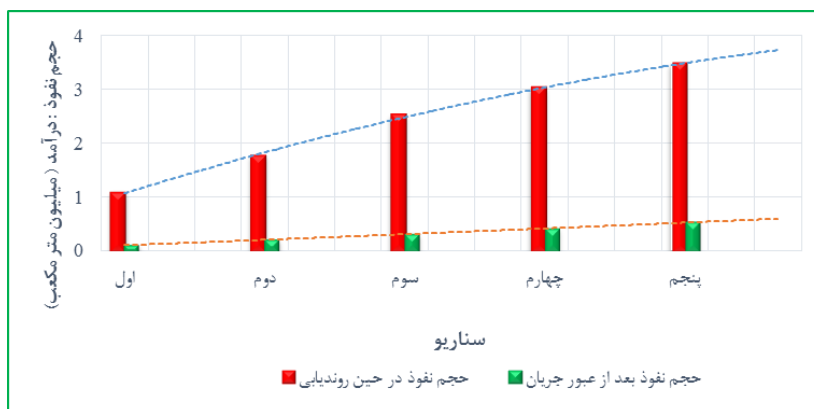
دیواره حوضچه‌ها، که حجم درخور توجهی را شامل می‌شود، در شکل ۱۱ آورده شده است.

#### گزینش سناریوی مناسب

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

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.

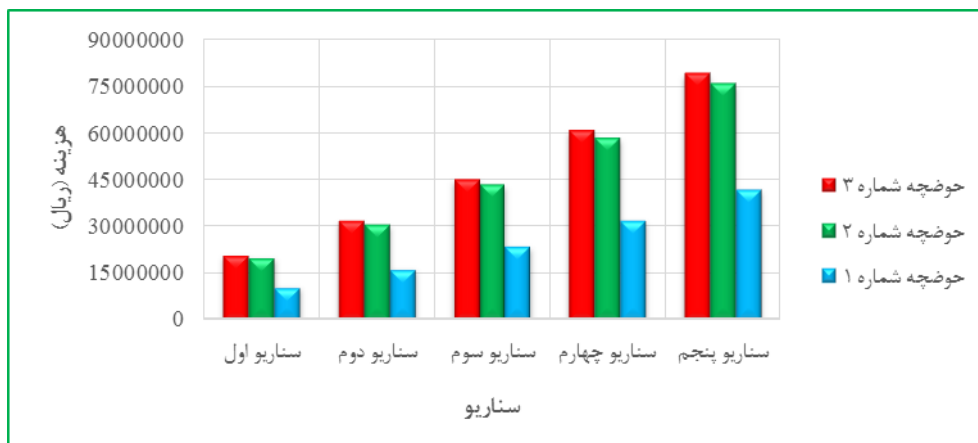
با توجه به شکل ۱۰، حجم آب نفوذیافته هنگام عبور جریان خیلی بیشتر از حجم آبی است که بعد از عبور جریان در مخزن می‌ماند و بعد از مدتی نفوذ می‌کند. در جدول ۴ مجموع حجم آب نفوذیافته در حوضچه‌ها در هر سناریو آورده شده است. برای نمونه، هزینه‌های احداث



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

جدول ۴. مجموع حجم آب نفوذ یافته در حوضچه‌ها در هر سناریو

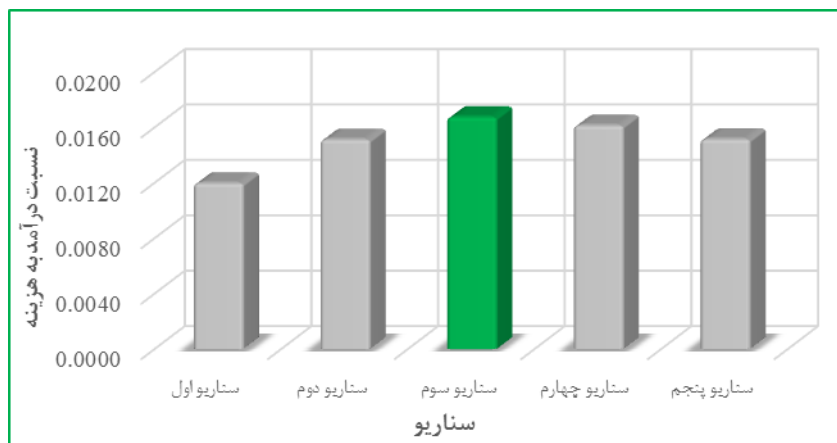
ارتفاع خاکریز (متر)	سناریو	حجم نفوذ هنگام روندیابی (میلیون مترمکعب)	حجم نفوذ در بعد از روندیابی (میلیون مترمکعب)	مجموع نفوذ (میلیون مترمکعب)
۱/۵	اول	۱/۰۸	۰/۰۹	۱/۱۸
۲	دوم	۱/۷۸	۰/۲	۱/۹۸
۲/۵	سوم	۲/۵۲	۰/۳	۲/۸۳
۳	چهارم	۳/۰۲	۰/۴۱	۳/۴۴
۳/۵	پنجم	۳/۴۸	۰/۵۲	۴/۰



شکل ۱۱. هزینه احداث حوضچه‌های تغذیه 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

انتخاب حالت بهینه برای احداث حوضچه‌های تغذیه مصنوعی نیز استفاده کرد. تغییرات سناریو شامل ۱/۵ - ۲، ۲ - ۲/۵، ۲/۵ - ۳ و ۳ - 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.

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 تغذیه 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

جدول ۶. مقادیر نسبت درآمد به هزینه در سناریوی برتر

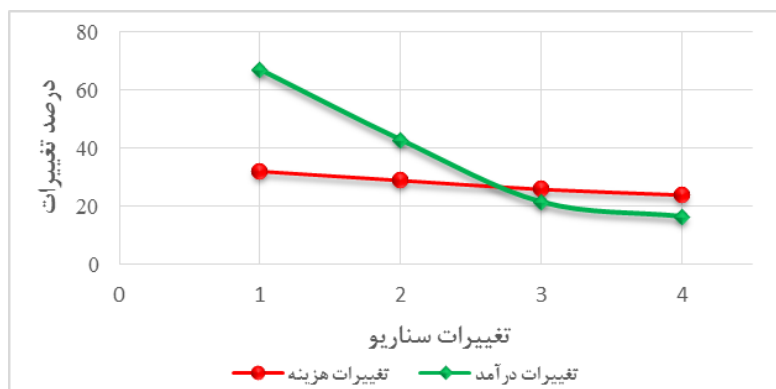
سناریو	ارتفاع (متر)	شماره حوضچه	مساحت (m <sup>2</sup> )	تراز سرریز	حجم نفوذ نهایی هنگام عبور جریان (million m <sup>3</sup> )	کل نفوذ آب (million m <sup>3</sup> )
		۱	۲۶۷۵۲/۷	۹۳۵/۵	۰/۳۹	
سوم	۲/۵	۲	۹۳۸۵۸/۶	۹۲۹/۵	۱/۳۱	۲/۸۳
		۳	۷۵۷۱۱/۶	۹۲۶/۵	۰/۸	

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

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



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

در نگاهی کلی تر به تحقیق، با توجه به مطالعات صورت گرفته و گزارش های موجود، در صورت تغذیه آبی معادل ۲۹/۰۲ میلیون مترمکعب به درون آبخوان، میزان آب تغذیه شده به آبخوان معادل آب تخلیه شده از آن خواهد بود. به بیانی دیگر، سفره به حالت تعادل خواهد رسید. از طرفی، بر اساس آمار موجود و میانگین آورد حجم سالیانه رودخانه حبله رود، ۳۲/۴۳ میلیون مترمکعب در سال از آب رودخانه به صورت مازاد از محدوده خارج می شود که بخش عمده ای از آن به صورت سیلابی است. بنابراین، با توجه به کاهش حجم سالانه ۲۹/۰۲ میلیون مترمکعب در مخزن، می توان با تغذیه 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 گفته شده در زمینه 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 پرایبی و بر اساس روندیابی جریان در حوضچه ها، ۳/۷۱ مترمکعب آب برای تغذیه آب زیرزمینی نفوذ می یابد. بر این اساس، می توان برنامه زمانی برای عملیات تغذیه در طرح تغذیه مصنوعی پیشنهاد کرد. بنابراین، می توان به عنوان برنامه زمان بندی، سیستم تغذیه 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.

در شکل ۱۳، روند تغییرات درآمد و هزینه در سناریو ها، 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 تغذیه مصنوعی است.

#### بحث و نتیجه گیری

هدف اصلی و کلی این تحقیق تعیین مناطق مناسب برای اجرای طرح تغذیه مصنوعی آب زیرزمینی در بهترین حالت نسبت درآمد به هزینه است. با بررسی و تجزیه و تحلیل نتایج تحقیق، اراضی مناسب برای اجرای طرح تغذیه مصنوعی با به کارگیری منطبق فازی، ۰/۸۶ درصد بسیار مناسب و ۴/۷۰ درصد مناسب به دست آمد. با افزایش ارتفاع دیواره حوضچه ها، 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 تغذیه مصنوعی دارد. در این سناریو حجم حوضچه اول ۰/۳۹، حوضچه دوم ۱/۳۱ و حوضچه سوم ۰/۸ میلیون مترمکعب بود که کل نفوذ آب در حوضچه ها برابر با ۲/۸۳ میلیون مترمکعب به دست آمد. بر اساس پارامتر تغییرات سناریو ها، مشاهده شد که روند تغییرات درآمد و هزینه در سناریو ها، به صورت نزولی بوده و با افزایش ارتفاع از ۱/۵ متر به دو متر شاهد بیشترین تغییر درآمد بوده ایم. بنابراین، بر اساس تغییرات درآمد سناریوی دوم یعنی ارتفاع دو متر بهترین حالت برای طرح تغذیه مصنوعی انتخاب شد.

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 Earth 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.