پنجمین کارگاه فنی زهکشی و محیط زیست
۱۶ آبان ماه ۱۳۸۷

بهینه‌سازی عمق نصب زهکش‌های زیرزمینی با ملاحظات اقتصادی و زیست محیطی

بیژن نظری[۱]، عبدالمجید لیاقت[۲]، مسعود پارسی‌نژاد[۳]، عبدعلی ناصری[۴]

چکیده

با افزایش جمعیت و کاهش سرانه منابع آب و خاک استفاده بهینه و پایدار از این منابع اجتناب‌ناپذیر خواهد بود. زهکشی اراضی از اقداماتی است که علاوه بر افزایش عملکرد در اراضی کشاورزی، استفاده پایدار از این اراضی را تضمین می‌کند. از مسائل و مشکلات اصلی طرح‌های زهکشی می‌توان به هزینه نسبتاً بالای این طرح‌ها، تولید حجم زیاد زهاب، تهدید کیفیت منابع آبی پایین‌دست، هزینه بالای دفع زهاب و اثرات سوء زیست‌محیطی ناشی از دفع زهاب اشاره کرد. عمق نصب زهکش‌های زیرزمینی از عوامل مهم موثر در عملکرد سیستم‌های زهکشی و اثرات زیست‌محیطی این طرح ها می‌باشد. در مناطق با آب‌های شور کم‌عمق، مانند شرایطی که در خوزستان وجود دارد، افزایش عمق نصب زهکش‌ها می تواند به افزایش نمک خروجی از زهکش‌های زیرزمینی منجر شود. کاهش عمق نصب زهکش‌ها نیز پیامدهای مختلفی را مانند ماندابی شدن، تجمع نمک در ناحیه ریشه گیاه و کاهش عملکرد گیاه در پی خواهد داشت. با توجه به مسائل فوق و اثرات پیچیده عمق نصب زهکش‌ها بر روی عملکرد گیاه، بازده اقتصادی و پیامدهای زیست‌محیطی طرح‌های زهکشی ضروری است که در انتخاب عمق نصب زهکش‌ها حالت بهینه تعیین گردد به نحوی که حداکثر بازده اقتصادی با حداقل اثرات سوء زیست‌محیطی ممکن همراه باشد. در این مطالعه به کمک قابلیت‌های مدل DRAINMOD-S در شبیه‌سازی عملکرد سیستم زهکشی، عملکرد محصول (نیشکر) و بار نمک زهاب، اثر عمق زهکش بر کارآیی اقتصادی و زیست‌محیطی سیستم زهکشی واحد امیرکبیر (از

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی آبیاری و زهکشی، دانشگاه تهران binazari@ut.ac.ir
۲ و ۳- به ترتیب دانشیار و استادیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران، aliaghat@ut.ac.ir
۴- استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

واحدهای کشت و صنعت نیشکر خوزستان) مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه با تلفیق پیامدهای اقتصادی و زیست‌محیطی، عمق نصب زهکش‌های زیرزمینی در قالب مفهوم بهره‌وری آب زیست محیطی، عمق بهینه نصب زهکش‌های زیرزمینی تعیین شده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد عمق نصب زهکش در منطقه مورد مطالعه بایستی از حد کنونی آن (۲ متر) به ۱/۵ متر کاهش داده شود و البته با توجه به اهمیت موضوع انجام مطالعات مزرعه‌ای جامع در این خصوص ضروری است.

واژه‌های کلیدی: عمق زهکش، محیط زیست، زهاب، بهره‌وری آب، DRAINMOD-S

مقدمه

با افزایش جمعیت و کاهش سرانه منابع آب و خاک استفاده بهینه و پایدار از این منابع اجتناب‌ناپذیر خواهد بود. زهکشی اراضی از اقداماتی است که علاوه بر افزایش عملکرد در اراضی کشاورزی، استفاده پایدار از این اراضی را تضمین می‌کند.

نگرش سنتی حاکم بر طراحی سیستم‌های زهکشی، هدف زهکشی را منحصراً افزایش عملکرد گیاه و بهبود شرایط محیط رشد می‌داند و اثرات زیست‌محیطی طرح‌های زهکشی را مورد بررسی قرار نمی‌دهد. امروزه این نگرش جایگاه خود را از دست داده است و در نگرش جدید علاوه بر اهداف کشاورزی و تولیدی، اهداف زیست‌محیطی نیز در طرح‌های زهکشی مورد بررسی قرار می‌گیرند.

دفع زهاب‌های حاصله از زهکشی اراضی کشاورزی که معمولاً کیفیت نامطلوبی دارند بسیار مشکل می‌باشد. دشواری و حساسیت مسئله، با وجود دو هدف همزمان افزایش عملکرد و حفظ محیط زیست دوچندان می‌شود. عدم دستیابی به راه حل‌های مناسب موجب از بین رفتن و به خطر افتادن اراضی کشاورزی خواهد شد (مانگورا وگاریس، ۱۹۹۷).

عمق نصب زهکش‌های زیرزمینی از عوامل مهم و موثر در عملکرد سیستم‌های زهکشی و اثرات زیست محیطی حاصل از این طرح‌ها می‌باشد. دورل و فیو (۱۹۹۰) مشاهده کردند که وقتی زهکش‌ها در عمق ۱/۸ متری نصب گردند، حدود ۳۰ درصد از جریان ورودی به داخل آنها از آب زیرزمینی خواهد بود و اگر عمق نصب به ۲/٦ متری برسد این مقدار به حدود ٦۰ درصد خواهد رسید. در نواحی خشک و با سفره آب زیرزمینی کم‌عمق شور، افزایش آب ورودی به داخل زهکش‌ها از اعماق پایین‌تر سفره زیرزمینی باعث کاهش کیفیت زهاب‌ها خواهد شد (آذری و همکاران، ۱۳۸۱).

آیرز و همکاران (۱۹۸۷) دریافتند که شوری زهاب خارج شده از زهکش‌های نصب شده در عمق ۲ متری بیش از شوری زهاب خارج شده از زهکش‌هایی است که در عمق ۱/۷ متری نصب شده‌اند. زهکش‌هایی که در عمق بیشتری نصب شده اند، دارای زهاب خروجی بیشتری نیز خواهند بود و زمانی که خروج زهاب از زهکش‌های کم عمق متوقف می شود خروج از زهکش‌های عمیق‌تر ادامه دارد.

اسکگز و چشیر (۱۹۹۹) از مدل DRAINMOD برای شبیه‌سازی سیستم زهکشی در ۱۷ فاصله زهکشی (از ۵ تا ۳۰۰ متر) و در پنج عمق زهکش (۰/۷۵ و ۱ و ۱/۲۵ و ۱/۵ و ۱/۷۵ متر)، در یک دوره ٤۰ ساله از

۱۹۵۱ تا ۱۹۹۰ استفاده نمودند. نتایج مدل در این مطالعه نشان داده است که به طور کلی با افزایش فواصل زهکش‌ها و با کاهش عمق نصب زهکش‌ها عملکرد گیاه کاهش داشته است.

ونگ و همکاران (۲۰۰۶) از مدل DRAINMOD برای پیش‌بینی عملکرد گیاه در زمین‌های با فواصل مختلف زهکشی استفاده کردند. در این مطالعه دو گیاه ذرت و سویا و چهار فاصله زهکشی (۵، ۱۰، ۲۰ و ٤۰ متر) در یک دوره ۱۵ ساله مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج نشان داده است که مدل کارآیی خوبی در پیش‌بینی محصول هر دو گیاه داشته است. محققین در این مطالعه برای طراحی فواصل زهکش‌ها در جهت دستیابی به عملکرد مطلوب گیاه، برتری مطالعات و شبیه‌سازی بلند مدت و چندساله را به مطالعات کوتاه مدت اعلام داشته‌اند. همچنین محققین در این مطالعه به این مسئله اشاره کرده‌اند که هرچند سیستم زهکشی مصنوعی برای دفع آب اضافی و ایجاد محیط مناسب برای رشد گیاه طراحی و اجرا می‌شود، اما زهکشی بیش از حد، به ویژه در دوره‌های حساس رشد گیاه، منجر به کاهش عملکرد گیاه و افزایش میزان تخلیه نیترات خواهد شد.

هورنباکل و همکاران (۲۰۰۷) سیستم زهکشی چند عمقی را برای بهسازی کیفیت آب زهکشی ارزیابی کردند. در این مطالعه سیستم زهکشی سنتی تک عمقی با سیستم زهکشی چند عمقی مقایسه شده است. نتایج این مطالعات نشان داده است که سیستم زهکشی چند عمقی، ماندابی را بهتر کنترل کرده و بدون اینکه افزایشی در تخلیه نمک[1] ایجاد نماید، آبشویی بهتری نسبت به سیستم تک عمقی داشته است. از طرف دیگر شوری زهاب در زهکش‌های کم‌عمق نسبت به زهکش‌های عمیق بسیار کمتر بوده است (٤/۷ در مقابل ۳۱/۷ دسی زیمنس بر متر) و ترکیب زهکش‌های کم عمق و عمیق (زهکش‌های چند عمقی) می‌تواند گزینه بسیار مناسبی برای مدیریت دفع زهاب باشد. به عبارتی در سیستم‌های زهکشی چند عمقی می‌توان در فصولی از سال که شوری زهاب مسئله‌ساز است، زهکشی را محدود به زهکش‌های کم عمق کرد و در خاک شوری را ذخیره کرد و در فصول دیگر که شوری زهاب کمتر مسئله‌ساز است از ترکیب زهکش‌های عمیق و کم‌عمق استفاده کرد. کریستن و اسکهان (۲۰۰۱) نیز با مطالعه زهکش‌های مول کم‌عمق بهبود چشمگیر شوری زهاب خروجی را گزارش کرده‌اند.

قائمی و ویلاردسون (۱۹۹۲) زهکش‌های کم عمق را علی رغم رفع مشکل ماندابی در کنترل موثر شوری خاک در بلند مدت ناموفق شمردند. هورنباکل و همکاران (۲۰۰۷) با اشاره به این موضوع که در زهکش-های کم عمق تخلیه آب از ناحیه ریشه سریعاً روی می‌دهد کارآیی زهکش‌های کم عمق را در شستشوی سریع نمک از پروفیل خاک بیشتر دانسته‌اند. با این وجود به این نکته نیز اشاره کرده اند که در شرایطی که تبخیر بالا بوده و جریان کاپیلاری نیز سهم قابل توجهی در تجمع نمک در خاک داشته باشد، زهکش های کم عمق به تنهایی نمی توانند از تجمع نمک در ناحیه ریشه جلوگیری کنند و در دراز مدت این سیستم ها ناکارآمد خواهند بود.

به دلیل اثرات پیچیده عمق نصب زهکش‌ها بر روی عملکرد گیاه، بازده اقتصادی طرح و همچنین مسائل

1- Salt load

زیست‌محیطی ضرورت انتخاب عمق بهینه نصب زهکش‌ها به نحوی که حداکثر بازده اقتصادی با حداقل اثرات سوء زیست‌محیطی (بار نمک زهاب) را در بر داشته باشد، وجود دارد. در این تحقیق با این نگرش عمق بهینه نصب زهکش‌ها تعیین شده است. در این راستا برای شبیه‌سازی وضعیت شوری در منطقه ریشه، زهاب خروجی از زه‌کش‌ها و عملکرد گیاه نیشکر در عمق‌های زهکش مختلف از مدل DRAINMOD-S استفاده شده است.

در ادامه با محاسبه هزینه‌ها و منافع حاصله از عمق‌های مختلف زهکشی و بر اساس روابط استخراج شده بین عملکرد گیاه و بار نمک زه آب خروجی با عمق نصب زهکش‌ها، عمق بهینه نصب زهکش‌ها تعیین شده است. در این مطالعه ملاحظات زیست‌محیطی حاصل از اعماق نصب مختلف در زه‌کش‌ها، در قالب بار نمک زهاب خروجی از زهکش های زیرزمینی تعریف شده است زیرا این پارامتر مهمترین فاکتور تعیین کننده میزان آلودگی و تخریب محیط زیست توسط زهاب می‌باشد. تلفیق پیامد اقتصادی عمق زهکش (عملکرد نیشکر) و پیامد زیست محیطی آن (بار نمک زهاب) در قالب مفهوم بهره‌وری هزینه زیست محیطی (بهره‌وری آبی که برای رقیق سازی زهاب تا حد کیفی قابل قبول لازم است.) انجام گرفته است.

مواد و روش‌ها

کلیات طرح زهکشی کشت و صنعت امیرکبیر

کشت و صنعت امیر کبیر یکی از شرکت‌های هفت‌گانه شرکت توسعه نیشکر و صنایع جانبی خوزستان است. این واحد در ٤٥ کیلومتری جنوب اهواز و در غرب رودخانه کارون و شرق جاده اهواز به خرمشهر واقع است. موقعیت جغرافیایی این واحد دارای حد شمالی ۳۱ درجه و ۱۵ دقیقه، حد جنوبی ۳۱ درجه و ٤٠ دقیقه، حد شرقی ٤٨ درجه و ۳۰ دقیقه (رودخانه کارون)، حد غربی ٤٨ درجه و ۱۲ دقیقه (جاده اهواز- خرمشهر) می‌باشد (منصوری سرنجیانه، ١٣٨٤). منبع تامین آب مورد نیاز واحد امیر کبیر رودخانه کارون است و نحوه برداشت آب از طریق سیستم پمپاژ می‌باشد. کیفیت آب در دسترس در ماه‌های مختلف سال متفاوت است. در جدول (۱) میانگین شوری ماهانه رودخانه کارون در محل ایستگاه پمپاژ امیر کبیر آورده شده است (گزارش سالانه مرکز تحقیقات نیشکر ۱۳۸۳).

جدول (۱): EC آب کانال امیر کبیر در ماه های فروردین تا دی سال ۱۳۸۳ (فصل آبیاری نیشکر) (dS/m)

ماه	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر	آبان	آذر	دی
شوری آب dS/m	۱/٦۰	۰/۹٦	۱/٤۸	۱/٦۱	۱/۷٦	۲/۳۱	۲/۲۲	۱/۷۷	۱/۷	۱/۷۹

مدل DRAINMOD-S

مدل DRAINMOD-S (کندبل، ۱۹۹۲) از زیرمدل‌های مدل DRAINMOD می‌باشد که علاوه بر قابلیت‌های مدل اصلی، قابلیت شبیه‌سازی شوری خاک و زهاب را نیز دارا می‌باشد. مدل DRAINMOD به منظور شبیه‌سازی نوسانات سطح ایستابی و زهاب خروجی از زهکش‌ها در مناطقی که سطح ایستابی در عمق کم قرار گرفته است به کار می‌رود. مدل بر اساس محاسبه معادله بیلان آب عمل می‌کند. مدل DRAINMOD قادر است عملکرد سیستم‌های مختلف مدیریت آب مانند زهکشی آزاد، زهکشی کنترل شده، آبیاری زیرزمینی و ترکیبی از این سه مورد را شبیه‌سازی کند.

داده‌های ورودی مدل DRAINMOD-S شامل داده‌های اقلیمی، خصوصیات فیزیکی خاک، شرایط اولیه شوری خاک (که شوری آب زیرزمینی هم در این قسمت معرفی می‌شود)، پارامترهای سیستم زهکشی و اطلاعات گیاه می‌باشد.

اطلاعات ورودی مدل DRAINMOD-S

اطلاعات هواشناسی مورد نیاز مدل شامل بارندگی ساعتی، تبخیر و تعرق پتانسیل روزانه و دمای روزانه (اختیاری) می‌باشد. در این مطالعه اطلاعات هواشناسی از پایگاه داده‌های ایستگاه هواشناسی اهواز مربوط به سال ۲۰۰٤ میلادی (۱۳۸۳ شمسی) تهیه و به مدل معرفی گردید. سال ۱۳۸۳ به علت در دسترس بودن اطلاعات بیشتری از شبکه زهکشی انتخاب گردید. به علت در دسترس نبودن اطلاعات بارش ساعتی از قابلیت مدل در تبدیل بارش روزانه به بارش ساعتی استفاده گردید. هرچند در مناطق خشک این مسئله می تواند منبع خطایی برای مدل باشد، از آنجایی که سهم بارش به آبیاری ناچیز بوده است (سالانه ۲۸/۵ سانتی متر و ۳۳۸/۵ سانتی متر)، این خطا تا حدی قابل اغماض می‌باشد. بدیهی است معرفی اطلاعات ساعتی بارش به مدل می تواند نتایج دقیق‌تری را داشته باشد. همچنین مقادیر تبخیر و تعرق به روش فائو پنمن مانتیث محاسبه شده و به مدل معرفی گردید.

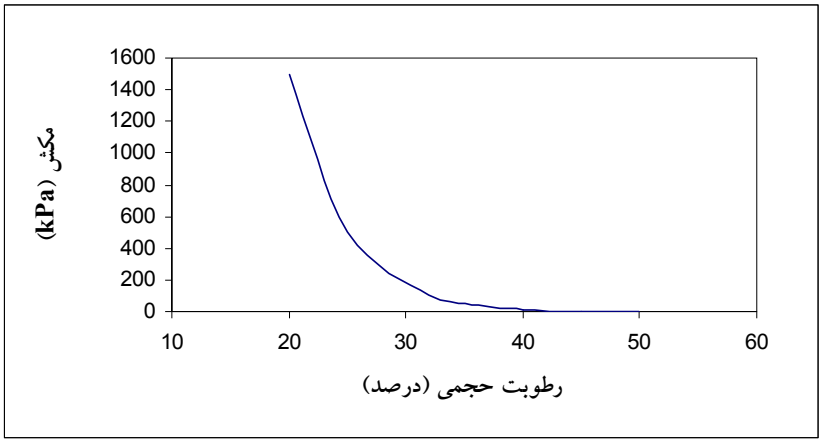
مهمترین اطلاعات ورودی خاک، اطلاعات مربوط به هدایت هیدرولیکی افقی خاک و منحنی مشخصه رطوبتی خاک می‌باشد. در جدول (۲) خلاصه‌ای از اطلاعات مربوط به بافت خاک آورده شده است. منحنی مشخصه رطوبتی خاک نیز در شکل (۱) نشان داده شده است.

جدول (۲): خلاصه‌ای از خصوصیات فیزیکی خاک مزرعه آزمایشی (منصوری سرنجیانه، ۱۳۸٤)

رس ٪	سیلت ٪	شن ٪	بافت خاک
۳۱	۳۳	۳٦	C.L.

اساس شبیه‌سازی شوری پروفیل خاک در مدل DRAINMOD-S، حل معادله Advective-dispersive

به روش بیلان جرم است (کندیل، ۱۹۹۲). در جدول (۳) شوری اولیه پروفیل خاک معرفی شده به مدل ارائه شده است. شایان ذکر است حد رسوب‌گذاری نمک، که از پارامترهای ورودی مدل DRAINMOD-S می‌باشد، با توجه به نوع نمک غالب آب آبیاری و محلول خاک برای نمک کلرید سدیم طبق توصیه ترک‌زبان (۱۳۷۹)، ۳۳۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر معرفی شد. ورودی‌های مورد نیاز مدل برای پارامترهای سیستم زهکشی در جدول (٤) خلاصه شده است.



شکل (۱): منحنی مشخصه رطوبتی خاک معرفی شده به مدل (منصوری سرنجیانه، ۱۳۸٤)

جدول (۳): شوری اولیه پروفیل خاک در ابتدای دوره شبیه‌سازی (حالت بعد از آبشویی اولیه خاک)

عمق خاک (cm)	۰-۳۰	۳۰-٦۰	٦۰-۹۰	۹۰-۲۰۰	۲۰۰-۳۰۰	۳۰۰-٤۰۰	٤۰۰-٤٥۰
شوری (dS/m)	۱/٤۳	۲	۲/۲۸	۳/۲٤	٤/٦۹	۹/۳۸	۲٥

جدول (٤): خلاصه‌ای از ورودی‌های پارامترهای سیستم زهکشی

پارامتر	مقدار
عمق زهکش (متر)	۲
فاصله زهکش‌ها (متر)	٤۰
ضریب زهکشی[۱] (سانتی متر در روز)	۱/۲
شعاع موثر زهکش‌ها[۲] (سانتیمتر)	۱/٥
عمق لایه غیر قابل نفوذ (متر)	٤/٥
حداکثر نگهداشت سطحی (سانتیمتر)	۱۰

۱- حداکثر مقداری که شدت تخلیه پیش‌بینی شده در مدل DRAINMOD می‌تواند داشته باشد، مقدار ضریب زهکشی معرفی شده به مدل می‌باشد. حداکثر ضریب زهکشی مشاهده شده در واحد امیرکبیر (منصوری سرنجیانه، ۱۳۸۴)، به عنوان حداکثر ضریب زهکشی ممکن به مدل معرفی شده است تا توان تخلیه لوله‌های زهکشی در شرایط واقعی لحاظ گردد.

۲- این پارامتر معادل شعاع دایره فرضی با مساحت سطح سوراخ‌های لوله زهکش در واحد طول لوله زهکش می‌باشد و با توجه به نوع و ابعاد لوله در کتابچه راهنمای مدل مقادیر آن آورده شده است.

به منظور امکان برآورد عملکرد نسبی نیشکر در تیمارهای مختلف مورد مطالعه، فایل مشخصه‌های گیاهی نیشکر، در مدل DRAINMOD ایجاد گردید. از مهمترین مشخصه‌های مطرح در این زمینه می‌توان به تاریخ کشت نیشکر، توسعه رشد ریشه در طول فصل رشد، آستانه تحمل و ضرایب کاهش عملکرد نیشکر در تنش‌های شوری، خشکی، ماندابی و تاخیر در کاشت اشاره کرد. به منظور تعیین تغییرات عمق ریشه در طول فصل رشد از روش توصیه شده در راهنمای مدل DRAINMOD استفاده گردید. اساس این روش استفاده از روند تغییرات ضریب گیاهی می‌باشد. به این ترتیب که در زمان حداکثر ضریب گیاهی، حداکثر عمق ریشه در نظر گرفته می‌شود. برای دوره‌های دیگر نسبت عمق ریشه دوره مربوطه به عمق ریشه حداکثر، معادل نسبت ضریب گیاهی آن دوره به ضریب گیاهی حداکثر در نظر گرفته می‌شود. نظر به اینکه نیشکر گیاهی چند ساله است با فرض شبیه سازی مدل برای کشت اول نیشکر از این روش استفاده شده است (اسکگز، ۱۹۷۸).

در مدل DRAINMOD اثر تنش ماندابی بر عملکرد محصول توسط شاخص تنش روز تنش ماندابی (SDIw) لحاظ می‌گردد. شاخص تنش روز در تنش ماندابی بر حسب ضریب حساسیت گیاه به ماندابی (CSw) و ضریب روز تنش (SDW) و به صورت رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

$$SDIw = \sum_{j=1}^{N} CDwj \times SDWj \qquad (۱)$$

در رابطه فوق j شماره روز از تاریخ کاشت محصول می‌باشد. به منظور تعیین ضرایب حساسیت نیشکر نسبت به تنش ماندابی در مدل DRAINMOD از مقادیر ارائه شده در مطالعه گایل و همکاران (۱۹۸۷) استفاده گردید. این مقادیر در جدول (۵) ارائه شده است.

جدول (۵): ضرایب حساسیت به تنش ماندابی در نیشکر (گایل و همکاران (۱۹۸۷))

مرحله رشد	طول دوره رشد	ضریب حساسیت گیاه به ماندابی (CS)
مرحله خواب تا رشد اولیه	۰-۱۳۰	۰/۶۰
مرحله میانی رشد	۱۳۱-۲۶۰	۰/۴۰
مرحله بلوغ	۲۶۱-۲۹۱	۰/۰۱

در طبقه‌بندی گیاهان زراعی نسبت به تحمل به شوری، نیشکر جزء گیاهان نسبتاً حساس قرار می‌گیرد. حد آستانه شوری در نیشکر ۱/۷ دسی زیمنس بر متر بوده و شیب کاهش عملکرد نیشکر نسبت به افزایش یک واحد شوری ۵/۹ درصد می باشد (احتشامی و همکاران، ۱۳۷۸).

نتایج

بهره‌وری آب

بهره‌وری آب[1] (WP) نسبت محصول تولیدی به ازای واحد آب برداشت شده و یا مصرف شده می‌باشد که محصول تولیدی می‌تواند در قالب مقدار فیزیکی (کمیت محصول به کمیت آب) و یا پولی (ارزش پولی محصول به ارزش پولی آب) و یا ترکیبی از این دو (ارزش پولی محصول به کمیت آب) باشد. بهره‌وری آب (WP) به شکل های مختلفی تعریف و استفاده می‌شود. تعریف مشخص و واحدی که درتمام شرایط مناسب باشد وجود ندارد. در بیان کلی بهره‌وری عبارت است از مقدار محصول به ازای واحد نهاده (بارکر و همکاران، ۲۰۰۳).

آمیختن زهاب با کیفیت ضعیف با آب آبیاری با کیفیت مناسب را اختلاط گویند. به شرط آنکه آب مخلوط شده در حد مناسب حاوی غلظت کمی از نمک و یون‌های سمی باشد، مخلوط کردن باصرفه‌ترین و قابل قبول‌ترین روش زیست‌محیطی دفع زهاب است (مهردادی و همکاران، ۱۳۸۰).

نظر به اینکه در این مطالعه هدف مقایسه کارآیی زیست محیطی عمق‌های زهکش مختلف بوده است، از ترکیب دو مفهوم بهره‌وری آب و اختلاط زهاب با آب آبیاری استفاده شده است. به این ترتیب بهره‌وری میزان آبی که باید برای رقیق‌سازی زهاب بکار رود در گزینه های مختلف محاسبه شده است. بهره‌وری آب در این مورد را می توان بهره‌وری هزینه زیست محیطی نامید. بدین ترتیب کارآیی اقتصادی عمق نصب زهکش (عملکرد نیشکر) در صورت کسر بهره‌وری آب و ملاحظات زیست‌محیطی عمق نصب زهکش (بار نمک زهاب که نشان‌گر حجم و شوری زهاب می‌باشد.) در مخرج کسر بهره‌وری آب لحاظ می‌گردند.

رابطه کلی مورد استفاده برای محاسبه بهره‌وری آب (بهره‌وری هزینه زیست محیطی) در این مطالعه به صورت زیر بوده است:

$$WP = \frac{P}{V_d} \qquad (٤)$$

در رابطه فوق WP: بهره‌وری آب (بهره‌وری هزینه زیست محیطی) بر حسب ریال بر متر مکعب آب، P: درآمد تولید نیشکر به ریال (ناخالص) و V_d: حجم آبی است که لازم است به زهاب تولیدی هر هکتار از اراضی نیشکر اضافه شود تا شوری زهاب را به حد قابل قبول زیست‌محیطی برساند و بر حسب متر مکعب می‌باشد.

در فرآیند اختلاط حجم آب لازم برای رقیق‌سازی زهاب خروجی از زهکش‌ها (V_d) با رابطه (٥) محاسبه شده است. همچنان که در رابطه (٥) ملاحظه می‌شود، حجم آب لازم برای رقیق‌سازی زهاب در هر روز و در سطح یک هکتار محاسبه شده و در نهایت مجموع مقادیر بدست آمده در روزهای مختلف سال به عنوان حجم آب لازم سالانه محاسبه می‌گردد.

1- Water Productivity

$$V_d = 10^2 \times [\sum_{i=1}^{365} q_i \times (\frac{EC_{dw} - EC_a}{EC_a - EC_i})] \qquad (۵)$$

که در آن

V_d: حجم آب لازم برای رقیق‌سازی زهاب خروجی از زهکش‌ها (متر مکعب در سال)؛ q_i: شدت زهکشی (سانتی‌متر بر روز)، (از نتایج مدل DRAINMOD-S)؛ EC_{dw}: شوری زهاب (ppm)، (از نتایج مدل DRAINMOD-S)؛ EC_i: شوری آب بکار رفته در رقیق‌سازی زهاب (ppm)؛ EC_a: حد شوری قابل‌قبول برای زهاب[۱] (ppm)

پس از محاسبه بهره‌وری آب در هر عمق، رابطه عمق زهکش و بهره‌وری آب بر اساس نتایج مدل DRAINMOD-S استخراج شده است. در ادامه به کمک نرم‌افزار بهینه‌سازی LINGO، عمق بهینه زهکش‌ها با هدف بیشینه‌سازی بهره‌وری آب (بهره‌وری هزینه زیست محیطی) تعیین شده است.

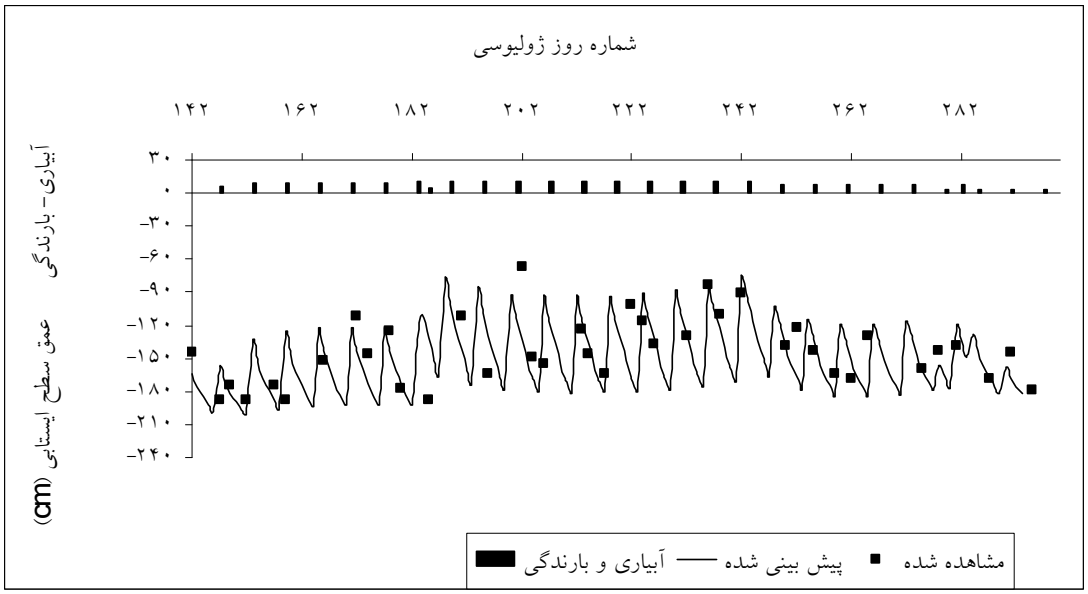
ارزیابی مدل DRAINMOD در منطقه مورد مطالعه

در این مطالعه مقادیر عمق آب زیرزمینی اندازه‌گیری شده (منصوری سرنجیانه، ۱۳۸۳) و پیش‌بینی شده در طی دوره تحت مطالعه در شکل (۳) نشان داده شده است. عمق آب زیرزمینی مربوط به وسط بین دو زهکش می‌باشد. ملاحظه می‌شود که تطابق خوبی بین مقادیر واقعی و مقادیر شبیه‌سازی وجود دارد.

در این مطالعه مقادیر میانگین انحراف مطلق و خطای استاندارد به ترتیب برابر ۲۲/۵ و ۲۹/۵ سانتی‌متر بدست آمده است که در محدوده گزارش شده سایر محققین می‌باشد. به طور کلی بر اساس تحقیقات انجام شده، میانگین انحراف مطلق و خطای استاندارد برای پیش‌بینی سطح ایستابی به ترتیب در محدوده ٤ تا ٢٤ و ٦ تا ٣٠ سانتی‌متر گزارش شده است (اسکگز (۱۹۷۸)، چنگ و همکاران (۱۹۸۳)، گوپتا و همکاران (۱۹۹۳)، وهبا و همکاران (۲۰۰۲)، ونگ و همکاران (۲۰۰٦)).

در این مطالعه از مدل DRAINMOD در شبیه‌سازی سیستم زهکشی در عمق‌های زهکش مختلف (از عمق ۱۰۰ سانتی‌متر تا عمق ۲۱۰ سانتی‌متر در فاصله‌های ۵ سانتی‌متری) استفاده شده است. نتیجه این شبیه‌سازی‌ها استخراج روابط عمق زهکش- عملکرد گیاه نیشکر و عمق زهکش – بار نمک زهاب بوده است. این روابط برای تعیین عمق بهینه زهکش‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

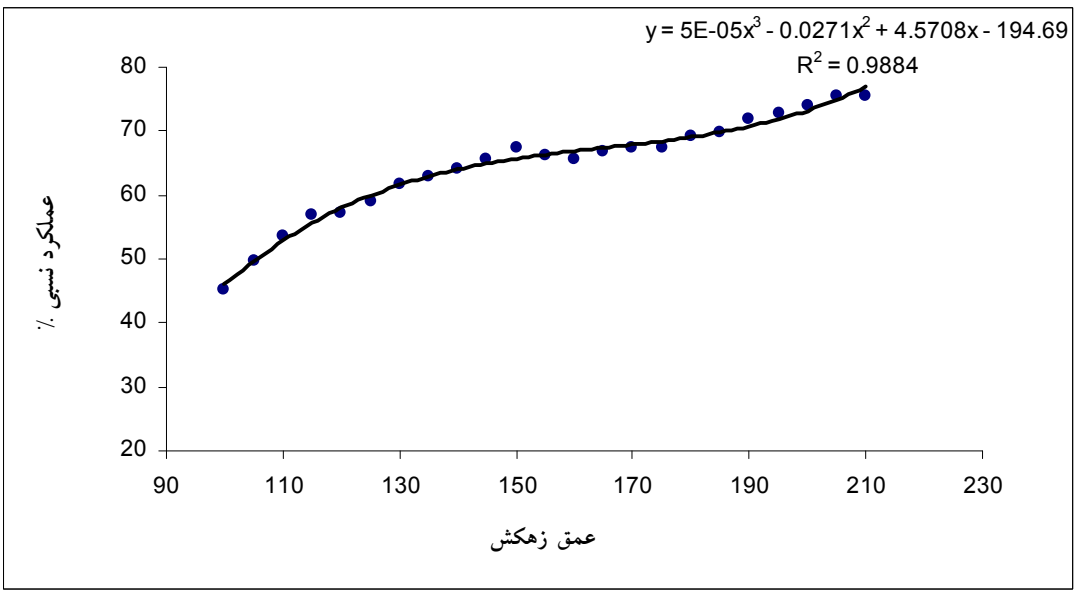
۱- حد شوری آب آبیاری برای پتانسیل عملکرد ۷۵ درصد در جو، سورگوم، گندم، نیشکر و ذرت به ترتیب ۸/۷، ۵/۶، ۶/۳، ۴ و ۲/۵ دسی‌زیمنس بر متر می‌باشد (حاج رسولیها، ۱۳۸۲). در این مطالعه با پیشنهاد کشت گیاهان مقاوم در پایین‌دست طرح زهکشی حد شوری قابل قبول برای زهاب ۶ دسی‌زیمنس بر متر در نظر گرفته شده است.



شکل (۳): مقایسه نوسانات سطح ایستابی مشاهده شده و پیش‌بینی شده

اثر عمق زهکش بر روی عملکرد نیشکر

در این مطالعه اثر عمق نصب زهکش‌های زیرزمینی بر روی عملکرد نیشکر بررسی شده است (شکل (٤)). این شکل نتیجه اجرای مدل DRAINMOD-S در بازه عمق زهکش ۱۰۰ تا ۲۱۰ سانتی‌متر و در فاصله‌های ۵ سانتی‌متری می‌باشد. به عبارتی تمامی معیارهای طراحی و مدیریتی در گزینه های مختلف یکسان بوده است و عمق زهکش تنها پارامتر متغیر در اجرای مدل بوده است.

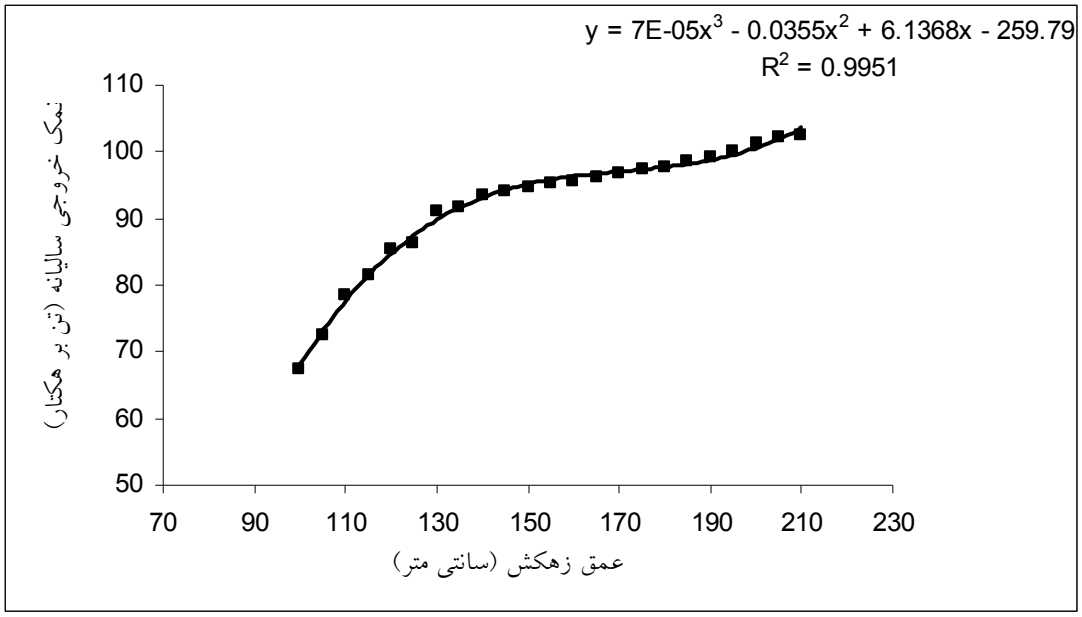


شکل (٤-۲): اثر عمق نصب زهکش‌های زیرزمینی بر عملکرد نیشکر

همانطوری که در شکل ملاحظه می‌شود، از عمق ۱۰۰ سانتی‌متری تا عمق ۱۵۰ سانتی‌متری با افزایش عمق نصب زهکش‌های زیر زمینی عملکرد نیشکر افزایش یافته است در حالی که از عمق ۱۵۰ سانتی‌متری تا عمق ۱۷۵ سانتی‌متری با افزایش عمق زهکش‌ها عملکرد نیشکر تغییر چندانی نداشته است. همچنین از عمق ۱۸۰ سانتی‌متری تا عمق ۲۱۰ سانتی‌متری با افزایش عمق نصب زهکش‌ها عملکرد نیشکر افزایش یافته است. نتایج نشان می‌دهد که همواره افزایش عمق نصب زهکش موجب افزایش یکنواخت عملکرد گیاه نخواهد شد. به این موضوع در مطالعات دیگر نظیر مطالعه (اسکگز و چشیر، ۱۹۹۹) نیز اشاره شده است.

اثر عمق زهکش بر روی بار نمک زهاب

فایل خروجی مدل DRAONMOD-S در پیش‌بینی شوری زهاب شامل ضریب زهکشی روزانه و شوری زهاب روزانه می‌باشد. از این نتایج میزان کل نمک خروجی از زهکش‌ها محاسبه شده است. شکل (۵) رابطه بین عمق زهکش‌ها و نمک خروجی از زهکش ها را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که با افزایش عمق زهکش، نمک خروجی از زهکش‌ها افزایش می‌یابد ولی روند افزایش خطی نیست. تا عمق ۱۵۰ سانتی‌متری روند افزایشی زیاد بوده ولی بعد از آن کاهش می‌یابد

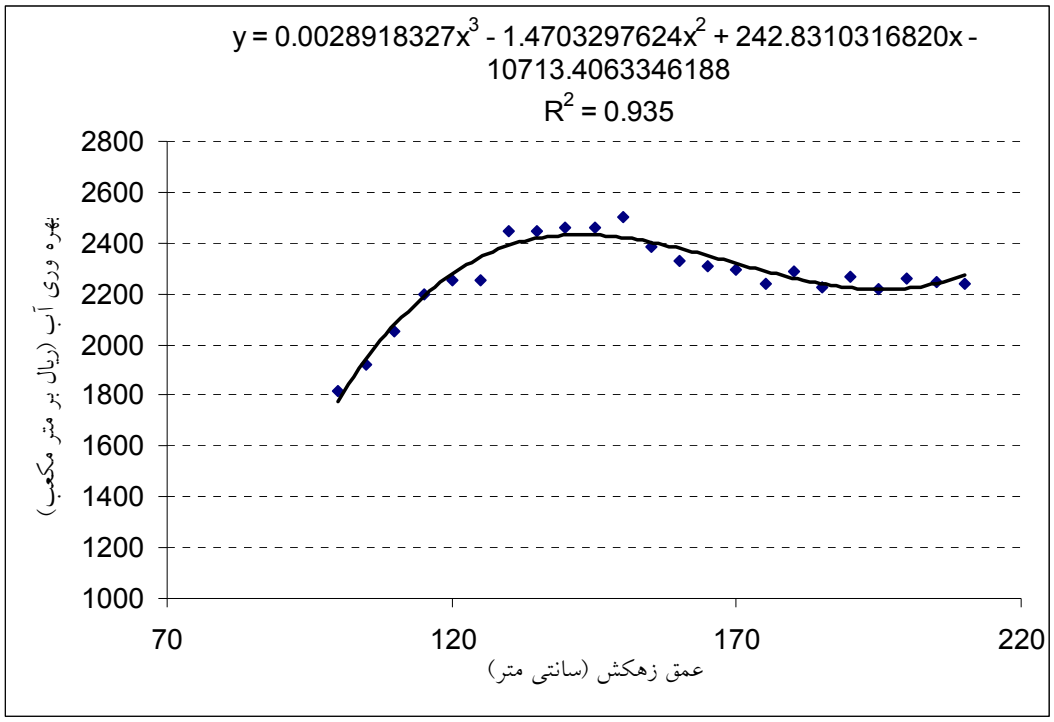


شکل (۵): اثر عمق نصب زهکش‌ها بر روی نمک خروجی از زهکش‌ها

عمق بهینه نصب زهکش‌های زیرزمینی

چنانچه گفته شد، به منظور تلفیق مناسب پیامدهای اقتصادی و زیست‌محیطی عمق نصب زهکش‌های زیر زمینی از مفهوم بهره‌وری آب (بهره‌وری هزینه زیست‌محیطی) استفاده شده است. شکل (٦) رابطه بین عمق زهکش‌ها و بهره‌وری آب را نشان می‌دهد. بهره‌وری آب (بهره‌وری هزینه زیست‌محیطی) در این مطالعه بر

اساس رابطه (۳) که صرفاً برای تلفیق اثرات اقتصادی و زیست‌محیطی اثر عمق زهکشها ارائه شده است، محاسبه گردیده است.



شکل (٦): رابطه بین عمق نصب زهکش‌ها و بهره‌وری آب (بهره‌وری هزینه زیست‌محیطی)

در ادامه به منظور تعیین عمق بهینه نصب زهکش‌های زیرزمینی از تابع هدف بیشینه‌سازی بهره‌وری آب استفاده شده است. به منظور حل تابع هدف، از نرم افزار LINGO 8 استفاده شده است. مدل نوشته شده در نرم‌افزار LINGO به صورت زیر می‌باشد[۱]:

```
max= 0.0028918327*depth^3 - 1.4703297624*depth^2 + 242.8310316820*depth - 10713.4063346188;
depth>=100;
depth<=220;
```

نتیجه حل تابع هدف فوق در محیط LINGO برابر ۲٤۰۱ ریال بر متر مکعب و در عمق زهکش برابر ۱٤۲/٤ سانتی‌متر بوده است (تعداد تکرار در حل تابع هدف: ۱۵). عمق زهکش ۱۵۰ سانتی‌متر می‌تواند معیار مناسبی برای طراحی زهکش‌های زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه باشد.

۱- ممکن است تعداد اعشار ضرایب رابطه بهره‌وری بیشتر از حد لزوم به نظر برسد اما باید توجه داشت که مقادیر عمق زهکش از ۱۰۰ تا ۲۲۰ سانتی متر تغییر می‌کند و تابع برازش داده شده تابعی درجه ۳ می باشد لذا رابطه حساسیت بالایی به ضرایب جمله های خود دارد (مثال: ۲۰۰ به توان ۳ برابر ۸۰۰۰۰۰۰).

بحث و نتیجه‌گیری

نظر به اینکه در این مطالعه از شبیه سازی عملکرد سیستم زهکشی استفاده شده است و در طی این روند فرضیات مختلفی در جهت ساده سازی شرایط پیچیده واقعی صورت گرفته است، ضروری است که قبل از بخش بحث و نتیجه گیری به مهمترین فرضیات مطرح اشاره شود.

جدول (٦): فرضیات و ساده سازی‌های مطالعه

فرضیات	ملاحظات
کارآیی مدل DRAINMOD-S در منطقه قابل قبول است.	مدل DRAINMOD (رحیمی قباق تپه، ۱۳۷۹) و DRAINMOD-S (ترک زبان، ۱۳۷۹) در منطقه خوزستان ارزیابی شده و کارآیی آن قابل قبول توصیف شده است. ارزیابی بیشتر و کالیبره کردن مدل در منطقه در افزایش اطمینان پذیری نتایج مدل ضروری است.
مهمترین پیامد اقتصادی سیستم زهکشی عملکرد محصول (نیشکر) است.	عمق زهکش بر روی هزینه نصب زهکش های مزرعه، جمع کننده و اصلی اثر قابل ملاحظه‌ای دارد که در این مطالعه از آن صرف نظر شده است.
مطالعه برای کشت اول نیشکر بوده است.	به علت عدم امکان معرفی منحنی ریشه گیاهان چند ساله در مدل DRAINMOD، این فرض جهت استخراج منحنی ریشه از منحنی ضریب گیاهی انجام شده است.
سیستم زهکشی مورد مطالعه در حالت بعد از آبشویی اولیه بوده است.	بسته به اینکه در شرایط آبشویی اولیه، سیستم زهکشی بعد از آبشویی اولیه و سیستم زهکشی به تعادل رسیده باشیم، شوری پروفیل خاک متفاوت خواهد بود. این مسئله به نوعی تفاوت در معیارهای طراحی بهبنه با توجه به اینکه در حالت شرایط طراحی اولیه، بهسازی سیستم و ... باشیم را مطرح می‌سازد.
مهمترین پیامد زیست محیطی سیستم زهکشی بار نمک زهاب بوده است.	ملاحظات قابل توجه دیگر که در این مطالعه امکان سنجش آن نبوده است: – تجمع نمک در پروفیل خاک در دراز مدت. – فرسایش، رواناب و شستشوی کود و ... .
شوری آب زیرزمینی توسط شوری پروفیل خاک به مدل معرفی شده است.	حد آستانه ترسیب نمک با توجه به توصیه ترک زبان (۱۳۷۹)، ۳۰۰۰۰ میلی گرم بر لیتر در نظر گرفته شده است.

نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که عمق نصب زهکش بر عملکرد گیاه نیشکر روندهای متفاوتی را دارد. این مسئله خاطر نشان می‌سازد که همواره افزایش عمق نصب زهکش موجب افزایش یکنواخت عملکرد گیاه

نخواهد شد. اسکگز و چشیر (۱۹۹۹) نیز در مطالعات خود به این مسئله اشاره داشته‌اند.

در این مطالعه تنش کم‌آبی در هیچ یک از تیمارها وجود نداشته است. این مسئله به علت حجم بالای آب آبیاری در واحد می‌باشد که قسمتی از این مقدار به منظور کنترل شوری و آبشویی غیر قابل اجتناب است و قسمتی از آن نیز می‌تواند با اصلاح راندمان آبیاری (ارتقای راندمان‌های انتقال، توزیع، کاربرد و ...) و راندمان آبشویی (آبشویی خارج از فصل، تغییر روش آبیاری و...) کاهش یابد. بهبود راندمان آبیاری و کاهش جزئی از آب که بدون کارآیی قابل قبول در آبشویی به زهاب می‌پیوندد، می‌تواند از اثرات سوء زیست‌محیطی طرح‌های زهکشی تا حد زیادی بکاهد (رمضانی اعتدالی و همکاران، ۱۳۸٦).

طبق نتایج مدل DRAINMOD-S، با افزایش عمق نصب زهکش‌ها از ۱۰۰ سانتی‌متر به ۲۱۰ سانتی‌متر تخلیه سالانه نمک از زهکش‌ها از ٦۷/٤ تن بر هکتار به ۱۰۲/۵ تن بر هکتار افزایش داشته است.

در این مطالعه به منظور تلفیق مناسب پیامدهای اقتصادی و زیست‌محیطی عمق نصب زهکش‌های زیر زمینی از مفهوم بهره‌وری آب استفاده شده است. مفهوم بهره‌وری ارائه شده در این مطالعه (بهره‌وری هزینه زیست‌محیطی) صرفاً برای تلفیق اثرات اقتصادی و زیست‌محیطی عمق نصب زهکش‌ها ارائه شده است و از آنجایی که این روش نیاز به قیمت‌گذاری بر روی آب، زهاب و یا اکوسیستم‌های طبیعی ندارد، محدودیت‌های مربوط به لحاظ کردن مسائل زیست‌محیطی در مطالعات اقتصادی را تا حدی کاهش داده است. واضح است که متناسب با اهداف مطالعات مختلف، مفاهیم و روابط مناسب برای بهره‌وری آب با هم متفاوت خواهد بود.

طبق نتایج این مطالعه عمق زهکشی بهینه از لحاظ اقتصادی (عملکرد نیشکر) و زیست محیطی (بار نمک زهاب) برابر ۱۵۰ سانتی‌متر بوده است.

لازم است یادآور شود که نیشکر در خوزستان به مدت ٤ سال زمین را اشغال می کند و جهت جریان آب به مقدار زیادی از بالا به پایین است. بنابراین شوری ثانویه خاک در اثر تبخیر در کشت نیشکر چندان محتمل نیست و ممکن است نتیجه به دست آمده برای سایر گیاهان که دوره رشد کوتاهتری دارند و به ویژه گیاهانی که در تابستان زمین را لخت نگه میدارند صادق نباشد.

با توجه به اثرات قابل توجه عمق نصب زهکش‌های زیرزمینی در کارآیی طرح‌ها و سیستم‌های زهکشی و اثرات زیست‌محیطی این طرح‌ها، مطالعاتی جامع در سطح مزرعه به منظور تعیین بهترین ترکیب عمق و فاصله زهکش‌ها لازم است که صورت گیرد. طبق نتایج این مطالعه عمق‌های مورد مطالعه باید محدوده عمق زهکش ۱٤۰ سانتی‌متر تا ۲۰۰ سانتی‌متر را تحت پوشش داشته باشد.

فهرست منابع

۱. آذری، ا. لیاقت، ز. دربندی، ص. ۱۳۸۱. زهکشی، کمیت و کیفیت جریان برگشتی. کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران.

۲. احتشامی، م. اشک تراب، ح. سیاهی، م.ک. ۱۳۷۸. مفاهیم زهکشی و شوری آب و خاک، کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران.

۳. بای بوردی، م. ۱۳۸٤، اصول مهندسی زهکشی و بهسازی خاک، انتشارات دانشگاه تهران، چاپ نهم. ٦٤١ صفحه.

٤. ترک زبان. ۱۳۷۹. ارزیابی و واسنجی مدل DRAINMOD-S تحت شرایط خشک و نیمه خشک ایران، پایان نامه کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، گروه آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران.

٥. حاج رسولیها، ش. ۱۳۸۲. کیفیت آب برای کشاورزی (ترجمه)، مرکز نشر دانشگاهی دانشگاه تهران.

٦. رحیمی قباق تپه. محمد. ۱۳۷۹. ارزیابی مدل DRAINMOD و بررسی تاثیر منطقه غیر اشباع خاک بر نوسانات سطح ایستابی در شرایط نیمه خشک خوزستان. پایان نامه کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، گروه آبیاری و آبادانی، دانشگاه شهید چمران اهواز

۷. رمضانی اعتدالی، ه. نظری، ب. لیاقت، ع. ناصری، ع. پارسی نژاد، م. بررسی اثر میزان تلفات انتقال شبکه های آبیاری و زهکشی بر حجم زهابهای کشاورزی (مطالعه موردی واحد میرزا کوچک خان اهواز)، همایش ملی محیط زیست و توسعه پایدار روستا، اسفند ۱۳۸٦

۸. فتحی، ق. ۱۳۷۸. رشد و تغذیه گیاهان زراعی. (ترجمه). انتشارات جهاد دانشگاهی مشهد. مشهد ،ایران، ۳۷۲ صفحه.

۹. گزارش سالیانه مرکز تحقیقات نیشکر. ۱۳۸۳ . شرکت توسعه نیشکر و صنایع جانبی. اهواز. ایران.

۱۰. گزارش کنترل محصول کشت و صنعت امیرکبیر. (۸٤- ۱۳۸۳). کشت و صنعت امیرکبیر، شرکت توسعه نیشکر و صنایع جانبی، اهواز، ایران.

۱۱. مهردادی، ن. عدل، م. زرنکابی، م. ر. ۱۳۸۰. مدیریت کیفیت زه آب های کشاورزی، کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران.

12. Ayars, J.E., and S.H. Patton, and R.A. Schoneman. 1987. Drain water quality from arid irrigated lands. P. 220-230 In W.R Johnston (ed.) Proc. 5th Natl. Drain. Symp., Chicago. IL. 13-14 December. ASCE, St. Joseph. MI.
13. Barker, R., Dawe, D., Inocencio, A., 2003. Economics of Water Productivity in Managing Water for Agriculture in "J.W. Kijne, R. Barker and D. Molden., Water Productivity in Agriculture: Limits and Opportunities for Improvement". CAB.
14. Christen, E.W., and Skehan, D., 2001. Design and management of subsurface horizontal drainage to reduce salt load . J. Irrig. Drain. Eng. 127 (3), 148-155.
15. Deverel, S.J., and J.L. Fio. 1990. Ground- water flow and solute movement to

drain laterals, western San Joaquin Valley. California. I. Geochemical assessment. Open-file Rep. 90-136. U.S. Geol. Surv., Sacramento, CA.

16. Gayle, G. A., Skaggs, R.W., Carter, C. E. 1987. Effects of Excessive soil water conditions on sugarcane yields. ASAE. Soil and Water Div. Vol 30 (4), 993-997.
17. Ghaemi, A.A, and Willardson, L.S., 1992. Salt management in a shallow drained soil with an artesian pressure. In: Land Reclamation: Advance in Research and Technology, Proceedings of the international Symposium, 14-15 December, Nashville, Tennessee, ASCE.
18. Gupta, G.P., Prasher, S.O., Chieng, S.T, and Mathur, I.N., 1993. Application of DRAINMOD under semi-arid conditions. Agric. Water Manage. 24, 63–80.
19. Hornbuckle, J.W., Christen, E.W., Faulkner, R.D., 2007. Evaluating a multi-level subsurface drainage system for improved drainage water quality. Agric. Water Manage. 89, 208–216.
20. Kandil, M.H 1992. DRAINMOD-S: A Water Management Model for Irrigated Arid lands. PhD Thesis, North Carolina State University, Raleigh.
21. Manguerra, H.B, and Garicia, L.A. 1997. Modeling flow and transport in drainage areas with shallow ground water. J. Irrig. Drain. Eng. 123 (3), 185-193.
22. Skaggs, R.W. 1978. A water management model for shallow water table soils. Technical Report No. 134 of the Water Resources Research Institute of the University of North Carolina, North Carolina State University, Raleigh, NC.
23. Skaggs, R.W., Chescheir, G.M., 1999. Application of drainage simulation models in " Skaggs, R.W.,Van Schilfgaarde, J., Agricultural Drainage II". Madison, Wisconsin, USA.
24. Wahba, M. A. S., M. El-Ganainny, M. S. Abdel-Dayem, H. Kandil and Atef. Gobran. 2002. Evaluation of DRAINMOD-S for simulating water table management under semi-arid conditions. Irrig. and Drain. 51: 213-216.
25. Wang, X., C. T. Mosley, J. R. Frankenberger and E. J. Kladivko. 2006. Subsurface drain flow and crop yield predictions for different drain spacings using DRAINMOD. Agricultural Water Management. 79: 113–136.