

بسم الله الرحمن الرحيم



وزارت جہاد کشاورزی
سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی
معاونت ترویج

زہکشی کنٹرل شدہ طراحی، اجرا و مدیریت

نویسندگان:

مجتبی اکرم - فؤاد تاجیک

۱۳۹۷

سرشناسه	: اکرم، مجتبی، ۱۳۲۷ -
عنوان و نام پدیدآور	: زهکشی کنترل شده: طراحی، اجرا و مدیریت/ نویسندگان مجتبی اکرم، فواد تاجیک؛ سرویراستار وجیهه سادات فاطمی؛ ویراستار ادبی محسن ربیعی؛ ویراستار ترویجی ام البنین تاجیک، حسام الدین غلامی؛ تهیه شده در موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، دفتر شبکه دانش و رسانه های ترویجی.
مشخصات نشر	: کرج: سازمان تحقیقات و آموزش کشاورزی، معاونت ترویج، نشر آموزش کشاورزی، ۱۳۹۶.
مشخصات ظاهری	: ۷۶ ص.؛ مصور.
شابک	: 978-964-520-403-5
وضعیت فهرست نویسی	: فیبا
موضوع	: زهکشی -- مدیریت
موضوع	: Drainage -- Management
موضوع	: زهکشی -- ایران -- مدیریت
موضوع	: Drainage -- Iran -- Management
موضوع	: زهکشی
موضوع	: Drainage
شناسه افزوده	: تاجیک، فواد، ۱۳۵۲ -
شناسه افزوده	: سازمان تحقیقات و آموزش کشاورزی. معاونت ترویج و آموزش. نشر آموزش کشاورزی
شناسه افزوده	: موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی. دفتر شبکه دانش و رسانه های ترویجی
رده بندی کنگره	: ۵۶۲۱/الف ۷۹ ۱۳۹۶
رده بندی دیویی	: ۶۳۱/۶۲
شماره کتابشناسی ملی	: ۵۱۱۱۹۴۱

ISBN:978-964-520-403-5

شابک: ۹۷۸-۹۶۴-۵۲۰-۴۰۳-۵



نشر آموزش کشاورزی

عنوان: زهکشی کنترل شده، طراحی، اجرا و مدیریت
نویسندگان: مجتبی اکرم، فواد تاجیک
ویراستاران ترویجی: ام البنین تاجیک، حسام الدین غلامی
ویراستار ادبی: محسن ربیعی
مدیر داخلی: شیوا پارسانیک
سرویراستار: وجیهه سادات فاطمی
تهیه شده در: مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، دفتر شبکه دانش و رسانه های ترویجی
ناشر: نشر آموزش کشاورزی
شمارگان: ۲۵۰۰ جلد
نوبت چاپ: اول/ ۱۳۹۷
قیمت: رایگان
مسئولیت صحت مطالب با نویسندگان است.

شماره ثبت در مرکز فناوری اطلاعات و اطلاع رسانی کشاورزی ۵۳۳۹۷ به تاریخ ۲۷/ ۱/ ۹۷ است.

نشانی: تهران- بزرگراه شهید چمران- خیابان یمن، پلاک ۱ و ۲، معاونت ترویج،

ص. پ. ۱۱۱۳-۱۹۳۹۵

تلفکس: ۲۱-۲۲۴۱۳۹۲۳

فهرست

۷	مقدمه
۹	تعریف زهکشی کنترل شده
۱۱	ابزار کنترل سطح ایستابی
۱۳	هدف های زهکشی کنترل شده
۱۴	مزایای زهکشی کنترل شده
۲۱	معایب زهداربودن زمین های کشاورزی
۲۳	معایب زهکشی کنترل شده
۲۶	چالش های مهم زهکشی زیرزمینی در کشور
۲۶	پیش نیازهای کاربرد زهکشی کنترل شده
۲۹	مناطق مناسب اجرا در ایران
۳۲	جنبه های اقتصادی و زیست محیطی
۳۳	تجربه های زهکشی کنترل شده
۴۰	طراحی زهکشی کنترل شده
۴۳	مبانی طراحی
۵۰	سازه های کنترل زهکشی
۶۰	نمونه طراحی
۶۲	مدیریت و روش های بهره برداری
۶۹	منابع

حدود ۴۰ درصد از غذای مردم جهان در اراضی فاریاب تولید می شود و تنها نزدیک به یک چهارم این زمین ها سامانه زهکشی دارند. برآوردها نشان می دهد که تا سال ۲۰۳۰ تنها می توان ۱۲ درصد به منابع آب افزود. تا این سال، برای تأمین غذا، مقدار تولید اراضی فاریاب باید ۸۰ درصد افزایش یابد. چنین افزایشی تنها با مدیریت بهتر منابع آب امکان پذیر است. ابزار مدیریتی مبتکرانه ای مانند زهکشی کنترل شده افق روشنی برای کاهش مصرف آب در بخش کشاورزی را نوید می دهد. این روش نه تنها در مصرف آب صرفه جویی می کند، بلکه از حجم زیاد زه آب نیز می کاهد و به بهبود کیفیت شیمیایی آب خروجی کمک می کند، دو موضوعی که سامانه های زهکشی کشور، بویژه در استان خوزستان، بشدت از آن رنج می برند. تحقیقات بسیار کمی در زمینه زهکشی کنترل شده در ایران انجام شده است. در کشورهای دیگر نیز تجارب موجود به اندازه ای نیست که کشاورزان عادی بتوانند آن را به کار برند. زهکشی کنترل شده امروزه نه تنها در کشورهای

پیشرفته‌ای مانند آمریکا و کانادا و کشورهای اروپایی، بلکه در کشورهایی مانند مصر و پاکستان نیز به گستردگی مورد استقبال و کاربرد قرار گرفته است. در هر حال، پژوهش‌های موفق و گسترش فزاینده این روش در جهان به اندازه‌ای است که می‌توان کاربرد آن را در برخی نقاط ایران و بویژه خوزستان نیز موفقیت‌آمیز پیش‌بینی کرد.

محققان عقیده دارند که زهکشی کنترل شده در آینده، چه در مناطق مرطوب و چه در مناطق خشک، جزئی کلیدی از مدیریت پایدار آب خواهد بود و نقش مدیریتی فعالی را در بهره‌برداری از منابع آب بازی خواهد کرد.

این نشریه کوششی است در این راه تا سیاست‌گذاران، مهندسان مشاور، کارشناسان آبیاری و زهکشی، مروجان، کشاورزان و دوست‌داران محیط زیست را با روش زهکشی کنترل شده و فواید ارزنده‌اش آشنا کند و راهنمایی کلی برای طراحی و مدیریتش باشد.

تعریف زهکشی کنترل شده

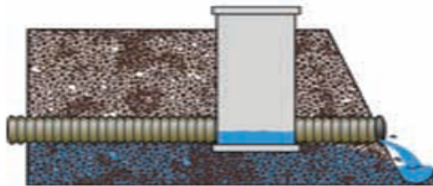
تا چندی پیش، هدف اصلی دست اندرکاران زهکشی، خارج کردن سریع تر آب اضافی از زمین بود و چنین پنداشته می شد که زهکش ها هرچه آب اضافی و نمک بیش تری خارج کنند، کارایی بیش تری دارند. به مرور زمان و به دلیل آلودگی های زه آب و اهمیت یافتن حفاظت از محیط زیست، امروزه وظیفه اصلی زهکشی به مدیریت سطح ایستایی تغییر یافته است.

با این نگرش، زهکشی عبارت است از مدیریت خاک و آب با خارج کردن آب سطحی اضافی و تنظیم سطح ایستابی کم عمق، با هدف دستیابی به منافع اقتصادی و اجتماعی به صورتی که از کارکردهای کلیدی زیست بوم محافظت کند. خارج کردن آب اضافی حجم زه آب را افزایش می دهد، خاک را از مواد غذایی تهی می کند و شوری و آلاینده هایی مانند نیترات را به منابع آبی پذیرنده زه آب مانند رودخانه ها منتقل می کند.

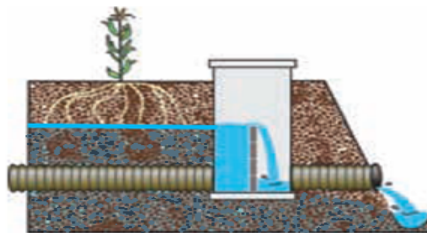
به اعتقاد اسکگز و اوانز^۱ (۲۰۱۲) نخستین کسی که مشخص کرد زهکشی کنترل شده را می توان در

۱. Skaggs & Evans

فصل زمستان در ایالت کارولینای شمالی به منظور کاستن از تلفات نیتروژن به مقدار ۴۰ تا ۵۰ درصد در تناوب ذرت، گندم، سویا به کار برد، گیلی ام در سال ۱۹۷۹ بود. زهکشی کنترل شده سازوکاری است برای اینکه سطح ایستابی در نیم رخ خاک به اندازه دلخواه تثبیت شود. در واقع، زهکشی کنترل شده روشی برای تلفیق مدیریت آبیاری و زهکشی است که حاصلش، از سویی، کاهش حجم زه آب و استفاده بیش تر از آب آبیاری یا باران، و از سوی دیگر، پیشگیری از شرایط ماندابی و انباشت نمک در خاک است. برای نمونه، چنانچه عمق ریشه در دوره ای از رشد گیاه نزدیک ۳۰ سانتی متر باشد، دلیلی ندارد که سطح آب در نیم رخ خاک تا سطح کارگذاری زهکش (مانند دو متری) پایین باشد. با این کار، گیاه از آبی که می تواند با استفاده از حاشیه موینه ای دریافت کند، محروم می شود. علاوه بر این، کارایی و بهره وری آب کاهش می یابد و نمک ها و آلاینده ها نیز از خاک خارج می شوند و به محیط آبی می رسند. شکل ۱ نمایی از زهکشی کنترل شده را در مقایسه با زهکشی متداول نشان می دهد.



زهکشی متداول



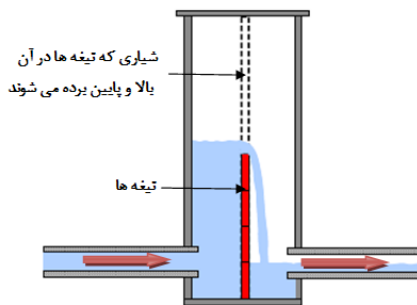
زهکشی کنترل شده

شکل ۱- نمایی از زهکشی کنترل شده
در مقایسه با زهکشی متداول

ابزار کنترل سطح ایستابی

هدف اصلی از کارگذاری ابزار کنترل سطح ایستابی در سیستم زهکش، کندکردن حرکت آب از خاک به زهکش هاست تا گیاه فرصت داشته باشد از این آب استفاده کند. متداول ترین ابزار کنترل سطح ایستابی در زهکشی روبسته (لوله ای)، صفحه

آب بند تنظیم شونده است که ممکن است از جنس پلاستیک، چوب، آلومینیوم یا آهن گالوانیزه باشد. در زهکشی روباز، از سرریز به عنوان ابزار کنترل سطح ایستابی استفاده می شود. نمونه هایی از این ابزار در شکل های ۲ و ۳ و ۴ نشان داده شده اند.



شکل ۲- کنترل سطح ایستابی در زهکش های روپسته



شکل ۳- کنترل سطح ایستابی در زهکش های روباز



شکل ۴- سازه کنترل زهکشی در کانال جمع کننده

ابزار کنترل زهکشی را به آسانی می توان درون چاهک های بازدید زهکش های زیرزمینی موجود نیز کار گذاشت.

هدف های زهکشی کنترل شده

بر اساس تحقیقات انجام شده، اهداف مدیریت سطح ایستابی و زهکشی کنترل شده شامل تمامی هدف های زهکشی معمولی به علاوه حفاظت از آب خاک، افزایش محصول با کاهش یا حذف تنش کم آبی و کاهش انتقال عناصر غذایی و آلاینده ها

از طریق زه آب است. هدف های طراحی و مدیریت سامانه کنترل سطح ایستابی به شرح زیر است:

- * کنترل شرایط شوری و سدیمی بودن خاک؛
- * کاهش یا رفع تنش آبی گیاه؛
- * کمینه سازی اثرات مخرب زیست محیطی؛
- * حفظ و کاربرد مؤثر آب حاصل از بارندگی و کاهش نیاز به آبیاری؛
- * حفظ شرایط رطوبتی خاک به گونه ای که انجام عملیات دیگری مانند خاک ورزی حفاظتی مؤثرتر و سودمندتر باشد.

مزایای زهکشی کنترل شده

۱- کاهش حجم زه آب

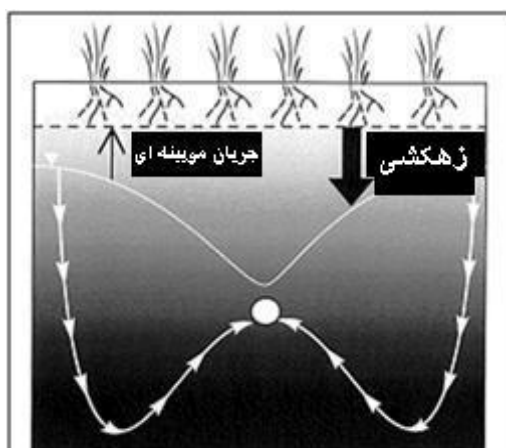
زهکشی کنترل شده با بالا آوردن سطح ایستابی، باعث کاهش شدت زهکشی و حجم زه آب می شود. اگر مقدار خروجی زه آب بیش از نیاز باشد یا احتمال تنش خشکی افزایش یابد، با بالا کشیدن آب بندها می شود خروج آب اضافی را از زهکش محدود کرد تا آب قابل استفاده گیاه^۱ از دسترسش خارج نشود. با

۱ . Available Water Content

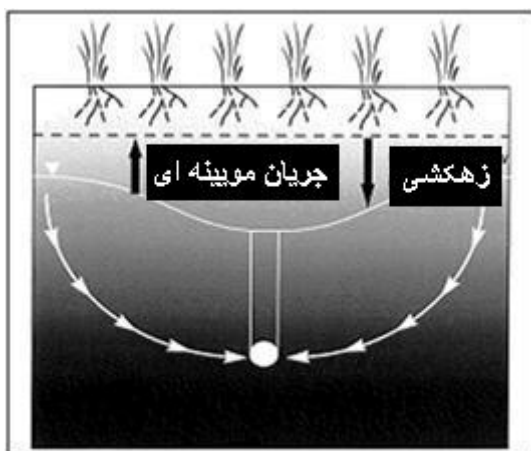
انجام زهکشی کنترل شده، آب ذخیره شده در نیم رخ خاک برای رفع نیاز آبی گیاه قابل استفاده خواهد بود و می تواند تنش های خشکی را کاهش دهد یا برطرف کند.

۲- کاهش حجم نمک خروجی

شکل ۵ مقایسه جریان آب درون خاک را در دو حالت زهکشی متداول و زهکشی کنترل شده نشان می دهد. در زهکشی متداول، جریان آب زیرزمینی به زیر زهکش می رود و سپس به سوی زهکش همگرا و به آن وارد می شود. از این رو نمک بیش تری را از زمین خارج می کند. در زهکشی کنترل شده، خطوط جریان کوتاه ترند و به همین دلیل، جریان در تماس کم تری با خاک شور قرار می گیرد و زه آب آن نمک کم تری را با خود به بیرون می آورد و همچنین مقدار صعود موئینه ای رطوبت در آن بیش تر است.



زهکشی متداول



زهکشی کنترل شده

شکل ۵- مقایسه جریان آب در سیستم های زهکشی زیرزمینی

۳- کاهش هدررفت فسفر و نیتروژن و حفظ حاصلخیزی خاک

نیتروژن و فسفر از عوامل مهم آلودگی آب هستند. آبشویی نیترات در سامانه زهکشی کنترل شده حدود ۵۰ درصد نسبت به زهکشی معمول کاهش می یابد. باقی ماندن نیترات در خاک برای جذب آتی گیاه مفید است. کاهش سرعت فرایند نیترات سازی به علت رطوبت زیاد خاک و تشدید فرایند تبدیل نیترات به نیتريت و سپس آمونیاک (دنیتریفیکاسیون) است. طبق بررسی های انجام شده، قسمت عمده کاهش تلفات نیترات مربوط به کاهش حجم زه آب در این روش مدیریتی است.

فسفر در بسیاری از خاک ها تثبیت می شود؛ از این رو، مقدار کم تری از آن به زهکش زیرزمینی می پیوندد. چنانچه کود فسفره روی زمین پخش شود و به زیر خاک نرود، قسمتی از آن پس از آبیاری به وسیله رواناب سطحی شسته و دفع می شود. به طور معمول نزدیک ۲۰ درصد فسفری که به خاک داده می شود از راه زهکشی وارد محیط زیست می شود. فسفر باعث افزایش مواد غذایی^۱ آب می شود که

۱. Eutrophication

پیامدش رشد جلبک‌هاست؛ جلبک‌هایی که با مصرف اکسیژنِ آب، آبزیان را با کمبود اکسیژن محلول در آب روبه‌رو می‌سازند.

۴- کاهش هدررفت باقی‌مانده علف‌کش‌ها و آفت‌کش‌ها و عناصر کمیاب

علف‌کش‌ها، آفت‌کش‌ها، فلزات سنگین و عناصر کمیاب در بیش‌تر مواقع به رسوب می‌چسبند و همراه با آن حرکت می‌کنند؛ مقداری از آنها نیز از زهکش‌های زیرزمینی خارج می‌شوند. در سامانه زهکشی کنترل‌شده، با کاهش حجم زه‌آب خروجی، از رهاشدن علف‌کش‌ها و آفت‌کش‌ها و سایر عناصر غذایی و رسوب به آب‌های سطحی نیز کاسته می‌شود.

۵- کاهش تخریب منابع پذیرنده زه‌آب

رودخانه‌ها، تالاب‌ها، دریاچه‌ها و دریاها مقصد زه‌آب‌ها هستند. کاهش حجم زه‌آب و کاسته شدن از شوری و همچنین کاهش هدررفت نیتрат و فسفات، باقی‌مانده علف‌کش‌ها و آفت‌کش‌ها و نیز عناصر کمیاب و فلزات سنگین موجب می‌شود که منابع پذیرنده زه‌آب سالم‌تر و پایدار باقی‌بمانند.

۶- ایجاد تعادل در آب خاک

روش زهکشی کنترل شده باعث کاهش دفعات آبیاری و ذخیره بیش تر آب در خاک برای استفاده گیاه می شود. به عبارت دیگر، در شرایط کمبود آب یا نامطمئن بودن منبع آب که باعث کاهش مقدار محصول می شود، کنترل زهکشی با ذخیره آب می تواند در مقدار آب خاک تعادل ایجاد کند و خشکی های کوتاه مدت را مدیریت کند.

۷- افزایش کارایی آبیاری

از دیدگاه زهکشی، گیاهان به علت حساسیت متفاوت به شرایط ماندابی و خشکی و نیز متناسب با عمق ریشه شان در طول سال نیازهایی متفاوت دارند. مدیریت سطح ایستابی متناسب با نیازها و شرایط مزرعه می تواند کارایی و بهره وری آب را افزایش دهد. کاهش حجم زه آب موجب کاهش تلفات آبیاری و در نتیجه افزایش کارایی مصرف آب می شود.

۸- افزایش بهره وری

بهره وری آب یعنی نسبت مقدار محصول تولیدشده به مقدار آب مصرف شده. بنابراین، واحد آن می تواند «مقدار محصول تولیدشده به کیلوگرم

به ازای هر مترمکعب آب مصرفی» باشد. به جای مقدار محصول می توان از ارزش محصول نیز استفاده کرد. در این صورت، واحد آن به صورت ریال به ازای هر مترمکعب آب مصرف شده بیان می شود. به این ترتیب، با افزایش عملکرد محصول یا کاهش آب مصرفی، بهره وری آب افزایش می یابد.

مقدار افزایش محصول در اثر کاربرد زهکشی کنترل شده به شرایط اقلیمی و مقدار بارندگی در هر سال بستگی دارد و ممکن است در سال های مختلف واکنش گیاه به زهکشی کنترل شده متفاوت باشد. انجام آزمایش های ۵ ساله افزایش ۴ تا ۱۱ درصدی را در مقدار محصول ذرت نشان داده است.

در زهکشی کنترل شده، عناصر غذایی بیش تری مانند ازت، فسفر و ریزمغذی ها در خاک باقی می مانند و باعث افزایش محصول می شوند. کاربرد آب به صورت پیاپی نیز می تواند امکان دسترسی به آب در حوضه را افزایش دهد. تاکنون درباره مدیریت زه آب بسیار نامطلوب از طریق کشت گیاهان مقاوم به شوری یا گیاهانی که به ترکیبات آلاینده مقاوم اند، بررسی کافی صورت نگرفته است.

به طور خلاصه، فواید زهکشی کنترل شده

عبارت اند از: افزایش کارایی آبیاری، افزایش مقدار رطوبت در دسترس گیاه، افزایش کارایی انرژی به دلیل کاهش پمپاژ آب آبیاری و زه آب، بهبود کیفیت آب خروجی به سبب کاهش آشویی عناصر غذایی و نیز کاهش خطر تخریب منابع پذیرنده زه آب و منابع آبی پایین دست. حاصل جمع این عوامل، افزایش مقدار محصول و پایداری محیط زیست است.

معایب زه داربودن زمین های کشاورزی

پیش از آنکه معایب و مشکلات زهکشی کنترل شده بیان شود، باید به معایب شرایط ماندابی یا معایب زه داربودن زمین های کشاورزی اشاره کرد. زه داربودن اراضی مشکلاتی را در فرایندهای مهم مرتبط با رشد گیاهان ایجاد می کند. از جمله این مشکلات عبارت اند از:

- ۱- ایجاد مشکل در رفت و آمد ماشین های کشاورزی؛
- ۲- گرم نشدن بموقع خاک و گریه شدن محصول؛
- ۳- شورشیدن خاک؛
- ۴- ایجاد مشکل در تبادل اکسیژن و دی اکسید کربن خاک با اتمسفر؛
- ۵- ایجاد مشکل در واکنش های اکسیداسیون،

احیا در خاک و آزاد شدن شکل گازی عناصر؛

۶- ایجاد مشکل در جذب برخی عناصر غذایی؛

۷- انباشت دی اکسیدکربن، متان و مواد سمی دیگر در خاک؛

۸- تولید محصولات جانبی شرایط احیا مانند نیتريت؛

۹- تولید شکل های بسیار محلول آهن و منگنز و سولفید هیدروژن در خاک.

این مسائل می توانند به طور مستقیم یا غیرمستقیم بر رشد گیاهان زراعی تأثیر بگذارند و جوانه زنی بذر، رشد سلول های ریشه، رشد طولی ریشه و رشد ساقه را محدود یا متوقف کنند.

زهکشی متداول با وجود فوایدی که برشمرده شد، خاک را از آب و مواد غذایی تهی و مواد آلاینده را به محیط زیست وارد می کند. زهکشی کنترل شده می تواند روشی مناسب برای مدیریت سطح ایستابی محسوب شود و فرصتی فراهم کند تا ضمن تأمین هدف های اصلی زهکشی، از اتلاف آب و عناصر غذایی و انتقال آلاینده ها جلوگیری شود.

معایب زهکشی کنترل شده

۱- خطر انباشت نمک در خاک

از آنجایی که زهکشی کنترل شده سطح ایستابی را برای مدتی طولانی بالا نگه می‌دارد و از مقدار زه آب در طول فصل رشد می‌کاهد، خطر انباشت نمک در خاک (بویژه اگر آب زیرزمینی شور باشد) وجود دارد. رژیم سطح ایستابی و برنامه ریزی آبیاری باید موازنه پایدار املاح در ناحیه ریشه را فراهم کنند. خاک با بافت متوسط و شوری اندک آب آبیاری، احتمال موفقیت کنترل شوری در روش زهکشی کنترل شده را افزایش می‌دهد. دقت کنید تا هنگامی که جریان آب در خاک از بالا به پایین است، خطر شور شدن خاک زیاد نیست؛ مگر آنکه فاصله دو آبیاری پیاپی به اندازه‌ای زیاد باشد که آب زیادی از سطح خاک تبخیر شود. از این رو به هنگام قطع آبیاری در پایان فصل، باید تمامی آب بندها را برداشت و زهکشی را آزاد کرد تا آب باقی مانده در نیم رخ خاک به طور کامل تخلیه شود.

۲- دشواری کار در خاک‌های سنگین

در خاک‌های سنگین، واکنش خاک به تغییر

سطح ایستابی کند است. به عبارت دیگر، با بالا یا پایین بردن آب بند در خروجی زهکش، زمان زیادی طول می کشد تا سطح ایستابی درون خاک به موقعیت دلخواه برسد.

دقت کنترل در زهکشی، بسته به نوع محصول می تواند متفاوت باشد. در مناطق مرطوب با خاک سنگین، مدیریت سطح ایستابی دشوارتر است. برای بیش تر گیاهان زراعی، شرایط ماندابی کوتاه مدت (۱۲ تا ۲۴ ساعت) اثرات مخرب بیش تری نسبت به شرایط کم آبی موقت دارد. اما در مناطق خشک و خاک های سبک، کنترل سطح ایستابی آسان تر است. در مناطق مرطوب که درصد زیادی از بارندگی در طول فصل رشد در ابتدای کاشت گیاه روی می دهد، بالانگهداشتن سطح ایستابی می تواند باعث کاهش گسترش ریشه گیاه شود. به این ترتیب، در دوره خشک توان جذب گیاه از عمق خاک کاهش می یابد و بر تنش خشکی می افزاید.

در زهکشی کنترل شده می توان ابزار کنترل خروجی زهکش را در نزدیکی عمق ریشه قرار داد تا در زمان های خشکی، امکان استفاده کامل گیاه از بارندگی فراهم شود. در این حالت ممکن است در

زمان های کوتاهی پس از بارندگی، شرایط ماندابی ایجاد شود.

۳- خطر تخریب ساختمان خاک

کاربرد زهکشی کنترل شده ممکن است باعث تخریب ساختمان خاک در اطراف لوله های زهکش، گرفتگی شیمیایی یا بیولوژیک لوله ها و تخریب کانال های زهکشی به علت نوسان سریع سطح آب شود. برخی از این مسائل در زهکش های معمول نیز مشاهده شده اند.

۴- خطرهای بهداشتی

در گذشته یکی از اهداف اصلی زهکشی و خشک کردن مرداب ها، از بین بردن مکان زیست عوامل بیماری زا مانند مالاریا و بیلارزیا بوده است. بالا آوردن سطح ایستابی در زهکشی کنترل شده ممکن است شرایط را برای همه گیری بیماری های مذکور فراهم کند. بدیهی است که این هشدار فقط وقتی اهمیت می یابد که سطح آب زیرزمینی به سطح زمین برسد و حالت مردابی مدتی به درازا بکشد.

چالش های مهم زهکشی زیرزمینی در کشور

چالش های بسیار مهم زهکشی زیرزمینی در کشور و بویژه در استان خوزستان را می توان به عوامل زیر نسبت داد:

- * حجم بالای زه آب (حجم زه آب تنها در حوضه کارون نزدیک به دو میلیارد مترمکعب در سال است)؛
- * کیفیت نامناسب زه آب (سالانه نزدیک به دو میلیون تن نمک فقط وارد رودخانه کارون می شود)؛
- * نبود تخلیه گاه مناسب زهکشی؛
- * استفاده بیش از اندازه از کود و سم کشاورزی؛
- زهکشی کنترل شده می تواند این مشکلات را کاهش دهد و همزمان کارایی و بهره وری آب را افزایش دهد.

پیش نیازهای کاربرد زهکشی کنترل شده

۱- اراضی کشاورزی کم و بیش مسطح

از معایب روش های مدیریت سطح ایستابی (زهکشی کنترل شده) امکان ناپذیری کاربردش در اراضی غیرمسطح است. هرچه زمین هموارتر باشد، تغییرات سطح ایستابی در گستره خاک کم تر است

و بنابراین با تعداد کم تری سازه می توان سطح آب درون خاک را در حد دلخواه نگاه داشت.

۲- استفاده از روش آبیاری سطحی

روش های آبیاری سطحی به طور معمول در زمین های مسطح کاربرد دارند و از این رو از زهکشی کنترل شده در آبیاری بارانی که عمده تاً در زمین های پرعارضه و شیب دار به کار می رود، نمی توان استفاده کرد. البته تردیدی نیست که برای کاربرد زهکشی کنترل شده در آبیاری بارانی در زمین های مسطح مانعی وجود ندارد.

۳- دارا بودن سامانه زهکشی مصنوعی

بی تردید زهکشی کنترل شده را تنها می توان در مناطقی اجرا کرد که شبکه زهکشی زیرزمینی داشته باشند یا زهکشی آنها از ابتدا بر پایه زهکشی کنترل شده طراحی شده باشد.

۴- وجود سازه هایی که بتوان سطح آب را در زهکش ها کنترل کرد

کنترل سطح ایستابی در خاک، نیازمند سازه ای برای اعمال کنترل است. معمول ترین سازه ها استفاده از چاهک های بازرسی است.

۵- علاقه و انگیزه کشاورزان و فعال بودن تشکل های بهره برداران

موفقیت در کاربرد زهکشی کنترل شده نیازمند دانش و آموزش بهره برداران است. از این رو، علاقه کشاورزان نقش زیادی در موفقیتش دارد. تا هنگامی که آب بسیار ارزان باشد، نمی شود کشاورزان را به استفاده از این روش ترغیب کرد. ایجاد مزارع ترویجی و نمایشی می تواند به پذیرش مردمی این روش کمک کند. فعال بودن تشکل های بهره برداران برای احداث و نگهداری از سیستم نیز لازم است.

۶- یکپارچگی و یک جا کشتی در اراضی گسترده

هرچند می توان سطح آب در زمین های زیر هر زهکش را به تنهایی کنترل کرد، اما بهتر است سطح آب زیرزمینی منطقه ای بزرگ تر به طور یکپارچه کنترل شود. هر چه زمین مسطح تر باشد، سازه های کمتری برای کنترل سطح ایستابی لازم است. چنانچه در بالادست نقطه کنترل گیاهان گوناگونی کشت شده باشند، شاید نتوان سطح ایستابی را طوری تنظیم کرد که برای همه آنها مناسب باشد. عمق ریشه گیاهان مهم ترین معیار در این امر است.

مناطق مناسب اجرا در ایران

حوضه های آبریز رودخانه های مهم مناطق خشک و نیمه خشک جهان کم و بیش هموار و حاصلخیز هستند. در این مناطق، با وجود کمبود منابع آب، کشاورزی فاریاب رواج دارد. در برخی از این مناطق، شرایط ماندابی در اثر بازدهی پایین آبیاری و شوری خاک، احداث شبکه زهکشی را ضروری ساخته است. بنابراین به طور کلی، البته نه همیشه، می توان چنین دشت هایی را برای کاربرد روش زهکشی کنترل شده مناسب دانست.

استان خوزستان ظرفیت فراوانی برای اجرای سیستم های زهکشی کنترل شده دارد. به نظر می رسد در طرح های نیشکر جنوب خوزستان تمام شرایط لازم برای اجرای این روش مهیاست. در این منطقه زمین تقریباً مسطح است، سازه های کنترل سطح آب به اندازه کافی وجود دارد، صاحبان اراضی (شرکت های هفت گانه نیشکر) خواهان صرفه جویی در مصرف آب هستند، از روش آبیاری سطحی استفاده می شود و در طول هر خط زهکش، تنها نیشکر کشت می شود و توان مدیریت این روش نیز دیده می شود.

زمین‌های پست حاشیه دریای خزر و اراضی شالیزاری نیز در صورت احداث زهکش، قابلیت اجرای زهکشی کنترل شده و پیدایش امکان کشت دوم و کاهش هدررفت آب و عناصر غذایی و آلاینده‌ها را دارند. بیش‌تر زمین‌های شالیزاری شمال کشور در جلگه‌های رسوبی و سیلابی، دلتاهای رودخانه‌ای، زمین‌های ساحلی، خاک‌های باتلاقی و به‌طور عمده در دشت‌های رسوبی رودخانه‌ای قرار دارند. شالیزارها در ابتدای پنجه‌زنی و برای گسترش ریشه‌ها، بهبود تهویه خاک و دفع سموم، چند روز قبل از برداشت و گاهی برای آماده‌شدن خاک برای کشت دوم به زهکشی نیاز دارند. در جدول ۱، میزان تحمل گیاه برنج به شرایط غیراستاندارد رطوبتی ارائه شده است.

جدول ۱- حداکثر روزهایی که برنج می‌تواند شرایط غیراستاندارد رطوبتی را در مراحل مختلف رشد گیاه تحمل کند

مراحل مختلف رشد	خاک‌های رسی (روز)	خاک‌های شنی (روز)
نشاکاری	۵	۳
پنجه‌زنی	۷	۴
رشد رویشی گیاهچه	۶	۳
خوشه‌دهی	۶	۳
گل‌دهی	۶	۳
قبل از دوره خشکی	۸	۴

بخشی از شالیزارهای موجود روی تراس‌های کوهپایه‌ای، به علت اختلاف ارتفاع دو تراس مجاور، پس از قطع جریان آب می‌توانند به صورت طبیعی زهکشی شوند. اما زمین‌های کم‌ارتفاع پایین دست کوهپایه‌ها زهکشی مطلوبی ندارند و بدون زهکشی کنترل شده نمی‌توان در هنگام پنجه‌زنی، برداشت و نیز آماده‌سازی زمین برای کشت دوم به خشک کردن شالیزار اقدام کرد. شکل ۶ مزرعه برنجی را نشان می‌دهد که در طرح مرکز ترویج و توسعه تکنولوژی هراز (کاپیک) در استان مازندران قرار دارد و در آن از زهکشی کنترل شده استفاده شده است.



شکل ۶- شالیزاری در مازندران که در آن از زهکشی کنترل شده استفاده شده است (ابزار کنترل زهکش در دست کارشناس دیده می‌شود).

جنبه های اقتصادی و زیست محیطی

هم بهره برداران و هم دولت ها از منافع اقتصادی حاصل از زهکشی کنترل شده بهره می برند: بهره برداران به طور مستقیم از طریق صرفه جویی در آب و کود و نیز افزایش محصول، و دولت ها با تقویت منابع ارزشمند آب و کاهش خسارات زیست محیطی. در آمریکای شمالی و شمال اروپا سالانه میلیون ها دلار برای تحقیق و توسعه زهکشی کنترل شده و مقابله با آلودگی نیتрат هزینه می شود، اما در کشورهای دیگر متأسفانه سرمایه گذاری چندانی برای بومی سازی روش های زهکشی کنترل شده صورت نمی گیرد. در مصر و چین اگرچه تحقیقاتی در حال انجام است، اما تا چند سال پیش راهبرد یا سرمایه گذاری مشخصی برای مطالعه و اجرای زهکشی کنترل شده در سطح ملی وجود نداشت. هزینه های اولیه اجرای زهکشی کنترل شده کمی بیش تر از سامانه های زهکشی رایج است، اما این سیستم توانایی افزایش عملکرد، کاهش نوسان مقدار محصول، کاهش خطر آلودگی منابع آب و کاهش هزینه های نگهداری را دارد.

تجربه های زهکشی کنترل شده

سابقه انجام زهکشی کنترل شده به صورت آزمایشی یا عملی از دهه های گذشته در کشورهایی مانند هلند، ایتالیا، چین، فنلاند، کانادا، مالزی، نیوزلند و ایران وجود داشته و در ابتدا در خاک های شنی و آلی استفاده شده است. البته تجربه نشان داده که این روش در خاک های سنگین تر نیز قابل اجراست. زهکشی کنترل شده، به دلیل جنبه های مثبت زیست محیطی و افزایش محصول، در ۲۰ سال اخیر در مناطق مرطوب آمریکا بسیار گسترش یافته است. اهداف طراحی عبارت اند از زهکشی در حد نیاز در دوره مرطوب و نیز کمینه سازی هدررفت آب در دوره خشک. در ایالت کارولینای شمالی آمریکا، زهکشی کنترل شده باعث افزایش ۲۵ درصدی محصول ذرت در اراضی دیم و افزایش ۱۵ درصدی در اراضی فاریاب شده است. جمع بندی داده ها در سطح وسیع ایالتی نشانگر آن است که کاربرد زهکشی کنترل شده، حجم زه آب را ۳۰ درصد، حجم نیتрат را ۵۵ درصد و حجم فسفر را ۳۵ درصد کاهش داده است. در آزمایش لایسیمتری پنج ساله با تناوب کشت

پنبه - آفتابگردان - یونجه در دره سان خواکین^۱ کالیفرنیا با اقلیم نیمه خشک و خاک سنگین با شوری پنج دسی زیمنس بر متر و کاربرد تیمارهای زهکشی آزاد و کنترل سطح ایستابی در یک متری سطح خاک، مشاهده شد که پنبه ۸ درصد، آفتابگردان ۲۵ درصد و یونجه ۱۵ درصد آب مورد نیاز خود را از آب زیرزمینی دریافت کرده‌اند. مطالعات نشان داده که در بلندمدت (چندصد سال) خطر شوری خاک جدی نخواهد بود.

در هلند از زهکشی کنترل شده بیش تر برای کاهش حجم زه آب ورودی به منابع آب سطحی و جلوگیری از آلودگی آنها استفاده می شود. هدف برنامه های مدیریت آب، ایجاد موازنه میان نیازهای کشاورزی، محیط زیست و کنترل سیلاب و تعدیل خسارت های احتمالی است. زهکشی کنترل شده ابزاری مهم برای مدیریت آب در سامانه های موجود آبیاری و زهکشی محسوب می شود.

در مصر انگیزه کاربرد زهکشی کنترل شده کمبود آب است و اجرای آن از مزارع برنج آغاز شد. صرفه جویی آب حاصل از زهکشی کنترل شده بیش

۱. San Joaquin

از ۵۰ درصد بوده است. علاوه بر آن، کاستن یک نوبت آبیاری، صرفه جویی در زمان کار کشاورزان، کاهش انرژی مصرفی در پمپاژ تا ۴۳ درصد و بازگشت سرمایه گذاری در نصب ابزار کنترل پس از دو فصل زراعی، از نتایج اجرای زهکشی کنترل شده بوده است. به طور کلی، در مطالعاتی که مؤسسه تحقیقات زهکشی مصر بین سال های ۱۹۹۶ تا ۲۰۰۰ انجام داده مشاهده شده است که اجرای زهکشی کنترل شده در قالب پروژه بهبود آبیاری باعث صرفه جویی ۱۰۵۰ مترمکعب آب در هکتار در سال و ۳۲ درصد کاهش زمان آبیاری در شالیزارها شده است.

در باغ های جنوب شرقی استرالیا (با اقلیم خشک و نیمه خشک) به منظور کاهش حجم و شوری زه آب، از زهکشی کنترل شده استفاده شده است. زهکشی کنترل شده در مقایسه با زهکشی معمولی باعث کاهش حجم زه آب شده است و تنها نزدیک به ۵ درصد از نمک های خاک را خارج و به محیط زیست وارد کرده است. توجه به این نکته لازم است که بالآ آمدن سطح ایستابی در روش زهکشی کنترل شده اگرچه فواید بسیاری در کاهش آب مصرفی و حجم زه آب شور دارد، اما می تواند نمک را در خاک انباشته

کند. بنابراین برای پایدار کردن سیستم زهکشی کنترل شده، پایش مداوم شوری خاک و مدیریت آن ضرورت دارد. در باغ‌های استرالیا افزایش شوری خاک در همه لایه‌ها مشاهده شده است و بیش‌ترین شوری در عمق ۰ تا ۳۰ سانتی‌متری خاک گزارش شده است. اگرچه در مدت دو سال اجرای آزمایش زهکشی کنترل شده کاهش محصول در اثر شوری مشاهده نشد، اما استفاده پایدار از این روش مستلزم توجه و در صورت لزوم اصلاح وضعیت شوری خاک خواهد بود. در نظر گرفتن دوره‌های آبشویی در میان دوره‌های کنترل زهکشی و نیز ایجاد شرایط زهکشی آزاد در طول بارندگی زمستانه یا در حین اولین آبیاری فصل رشد از جمله راهکارهای مدیریتی مناسب برای جلوگیری از خطر شور شدن خاک است.

در ایران تنها یک کار پژوهشی درباره زهکشی کنترل شده در اراضی زیر کشت نیشکر انجام شده است که نتیجه‌اش کاهش آب مصرفی گیاه یا آب آبیاری بوده است. در ایران، از گذشته و تاکنون انواعی از زهکشی کنترل شده مورد استفاده بوده که بستن خروجی زهکش توسط کشاورزان در سیستان و مغان و فارس و آبیاری جزرومدی در نخلستان‌های آبادان از

آن جمله هستند. طرح موفق زهکشی کنترل شده در مزرعه کاپیک که با همکاری سازمان همکاری های بین المللی ژاپن (جایکا)^۱ در مازندران اجرا شد، نمونه ای جالب است. بررسی ها در این مزرعه نشان از موفقیت زهکشی کنترل شده دارد، اما الگوبرداری از این سیستم موفق انجام نشده است، تاجایی که حتی بسیاری از کارشناسان آبیاری نیز از وجودش بی خبرند. برخی شواهد نشان می دهد که زهکشی کنترل شده در شرایط خاص ایران، گزینه ای مناسب و شایان بررسی برای بهبود مدیریت و کارایی مصرف آب است.

نکته مهم آن است که خشکسالی های اخیر در کشور موجب کاهش عملکرد گیاهان در شبکه های مدرن آبیاری نشده است. هرچند زهکشی کنترل شده در این شبکه ها وجود نداشته، اما این امر بخوبی نشان دهنده آبیاری بی رویه و امکان افزایش بهره وری آب است. در سیستان نیز زارعان در برخی مواقع خروجی زهکش های زیرزمینی را با گونی می بندند. این کار در نظر اول عجیب می آید، ولی حقیقت این است که زارعان دریافته اند در

شرایط کم آبی، زهکش‌ها رطوبت در دسترس گیاه را «هدر» می‌دهند. آنها با بستن خروجی زهکش‌ها تعداد دفعات آبیاری را کاهش می‌دهند و به گیاه امکان می‌دهند از رطوبت باقیمانده در قسمت بالایی نیم‌رخ خاک استفاده کند. بدیهی است که کشاورزان بیش‌تر به فکر حفظ رطوبت خاک هستند و به انباشت شوری در بلندمدت نمی‌اندیشند. در جزیره آبادان، نخلستان‌های حاشیه اروندرود و بهمنشیر از دهه‌های گذشته با استفاده از جزرومد متناوب دریا آبیاری و زهکشی شده‌اند. با شروع مد، آب رودخانه بالا می‌آید و به سمت درختان جریان می‌یابد و ناحیه ریشه درختانی که چند متر با جوی آب فاصله دارند مرطوب می‌شود. این حالت چند ساعت ادامه می‌یابد. با شروع جزر، عمل زهکشی آغاز می‌شود و آب از سمت درختان به سمت رودخانه جریان پیدا می‌کند. این کار را می‌توان زهکشی کنترل‌شده توأم با آبیاری زیرزمینی دانست (شکل ۷).



شکل ۷- آبیاری و زهکشی جزرومدی در نخلستان های آبادان

در حال حاضر این فرایند در کنترل طبیعت (جزرومد) است، اما بخوبی توانسته رطوبت خاک را در حد مطلوب نگاه دارد و از این رو روشی موفق بوده است. از نظر شوری، تنها در حدود ۱۰ سال اخیر است که با تخریب کیفیت آب رودخانه کارون مشکلاتی در منطقه پدیدار شده است. اگر آب مصرفی به علت پس زدگی آب دریا به این اندازه شور نبود، این مشکلات نیز پیش نمی آمد. به عبارت دیگر، مشکل زهکشی کنترل شده در جزیره آبادان به شوری آب مرتبط است و به ناکارآمدی سیستم ربطی ندارد. این روش سال های سال و هنگامی که شوری آب کم تر بود، عملکردی موفق داشته است.

طراحی زهکشی کنترل شده

۱- کلیات طراحی

تاکنون معیارهایی برای تعیین مقدار بهینه زهکشی در همه مناطق و شرایط وضع نشده است. حد لازم زهکشی به عواملی مانند مدت و شدت بارندگی، ویژگی‌های فیزیکی خاک، دمای هوا و خاک، نوع گیاه و مرحله رشد آن بستگی دارد. بنابراین طراحی و مدیریت زهکشی به اقلیم، ویژگی‌های خاک و نیازهای گیاه در منطقه مورد نظر وابسته است. بهترین عملکرد گیاهان در سیستم زهکشی کنترل شده هنگامی به دست می‌آید که مزرعه از ابتدا برای این سیستم طراحی شده باشد. در طراحی و اجرای سیستم جدید، عوامل مهمی مانند عمق توسعه ریشه، عمق تثبیت سطح ایستابی، مقاومت گیاه به تنش آبی و عمق و فاصله زهکش‌ها باید در نظر گرفته شوند. همچنین ویژگی‌های مهمی مانند ظرفیت نگهداری آب در خاک، هدایت هیدرولیکی و لایه بندی نیم‌رخ خاک، مقدار و شیوه توزیع بارندگی یا آبیاری باید تعیین شوند و امکانات سخت‌افزاری و نرم‌افزاری برای بهره‌برداری، پایش و ارزیابی دائمی سامانه نیز تأمین شوند.

معیارهای طراحی و بهره برداری از زهکشی کنترل شده هم جنبه های سازه ای و هم جنبه های مدیریتی را شامل می شود. برای مثال درباره مکان، اندازه و نوع سرریزها، ارتفاع سرریز و نحوه بهره برداری از آن (شامل ارتفاع فصلی سرریز، برنامه ریزی واکنش به بارندگی، دوره های خشک، آلاینده ها و...) باید از پیش تصمیم گیری شود. ابزار کنترل زه آب و مدیریت آنها نیز باید مشخص شود. همه این ابزارها باید متناسب با منابع آب (سطحی و زیرزمینی) طراحی و مدیریت شوند.

۲- اطلاعات مورد نیاز طراحی

داده های لازم برای طراحی زهکش زیرزمینی در مناطق خشک غرب آمریکا شامل این موارد است: لایه بندی خاک، تعیین عمق لایه ناتراوا^۱، ویژگی های هیدرودینامیکی خاک، الگوی کشت، نوع و برنامه ریزی آبیاری، کارایی مصرف آب، اطلاعات اقلیمی، عمق تثبیت سطح ایستابی، مقدار نفوذ عمقی، شوری خاک و شوری آب زیرزمینی. نمونه برداری خاک معمولاً در عمق دو تا چهار متری صورت می گیرد (در استاندارد ایران، عمق لایه بندی خاک تا پنج یا شش متری است) و در برخی نقاط تا رسیدن به لایه نفوذناپذیر است. همچنین،

۱. impermeable

نیم‌رخ شوری خاک در بالای زهکش‌ها برای تعیین ضرورت اصلاح خاک و در پایین زهکش‌ها برای تعیین مقدار احتمالی انتقال املاح از زهکش‌ها تعیین می‌شود. آگاهی از توزیع شوری در نیم‌رخ خاک برای تعیین عمق مناسب نصب لوله‌های زهکش ضرورت دارد. در طراحی زهکشی کنترل شده نیز به همین اطلاعات نیاز است. در طرح‌هایی که زهکش‌های متداول از قبل احداث شده‌اند و قرار است به سامانه زهکشی کنترل شده مجهز شوند، فقط کمبودهای اطلاعاتی تکمیل می‌شود. تلاش می‌شود که طرح زهکشی کنترل شده، تا جای ممکن، منطبق با طرح موجود باشد و تغییرات لازم به سازه‌های کنترل سطح آب محدود شود (شکل ۸).



شکل ۸ - سازه کنترل نصب شده در مزرعه دارای زهکش

مبانی طراحی

۱- عمق نصب زهکش

عمق زهکش های کنترل شده همانند زهکش های متداول در نظر گرفته می شود. در تعیین عمق زهکش به موضوع بازگشت شوری خاک توجه ویژه ای می شود، زیرا زهکش های کنترل شده نیز در مواقعی از سال باید همانند زهکش های متداول کار کنند تا از شور شدن دوباره خاک جلوگیری شود.

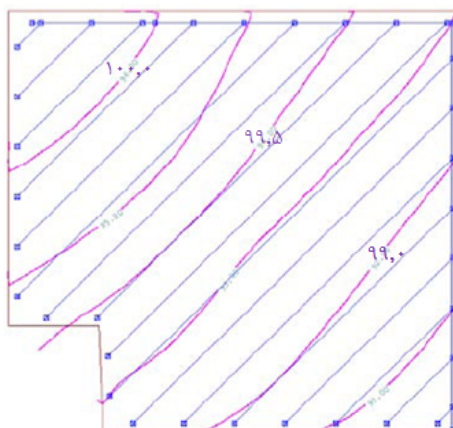
۲- تسطیح و شیب

برای توزیع یکنواخت رطوبت در نیم رخ خاک و در نزدیکی ناحیه ریشه و همچنین پیشگیری از جمع شدن موضعی آب در سطح خاک در هنگام بارندگی، تسطیح خاک ضروری است. در اراضی هموار، اگر خروجی زهکش زیرزمینی مستقیماً به کانال زهکشی روباز وارد شود، ابزار کنترل در قسمت هایی از کانال نصب می شود که مدیریت سطح ایستابی بالادست امکان پذیر باشد. همچنین، در صورت وجود ایستگاه پمپاژ در سیستم زهکشی، با خاموش یا روشن کردن پمپ می توان سطح ایستابی را کنترل کرد. راه حل مهندسی کنترل سطح

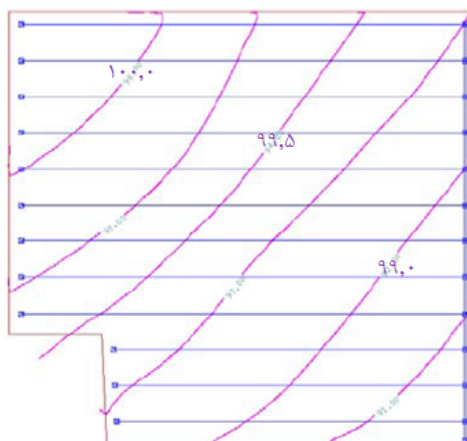
ایستابی باید با توجه به شرایط خاص هر منطقه انتخاب شود. در طراحی زهکشی کنترل شده، نصب زهکش ها به موازات خطوط تراز موجب می شود که تعداد سازه های کنترلی کم تر و بهره برداری نیز ساده تر شود. در شکل ۹ این موضوع بخوبی نشان داده شده است. هرچه خاک مسطح تر باشد، مساحتی که با کارگذاری یک سازه کنترلی می شود زهکشی کرد، بیش تر خواهد شد.

۳- برآورد خیز مویینه ای به منظور طراحی

اطلاعات کافی درباره مقدار و چگونگی خیز مویینه ای آب در خاک های مختلف از مقدمات طراحی و اجرای سیستم زهکشی کنترل شده است. به طور کلی، مقدار تقریبی خیز مویینه ای در خاک های ریزدانه و سنگین بیش از ۸۰ سانتی متر، در خاک های درشت دانه و سبک ۲۰ تا ۵۰ سانتی متر و در خاک های بافت متوسط ۵۰ تا ۸۰ سانتی متر برآورد می شود.



آرایش مناسب زهکش ها با هدف کاربرد زهکشی کنترل شده



آرایش مناسب زهکش ها با هدف کم کردن هزینه

شکل ۹- آرایش مناسب زهکش ها در زهکشی کنترل شده

در طراحی زهکشی کنترل شده، سطح ایستابی در نیم رخ خاک باید در عمقی نگهداشته شود که گیاه بر اثر خیز مویینه ای بتواند بیش ترین رطوبت ممکن را جذب کند. برای مثال، چنانچه عمق ریشه گیاهی در زمان مشخصی از دوره رشد ۵۰ سانتی متر و خیز مویینه ای ۴۰ سانتی متر باشد، بهتر است که سامانه زهکشی کنترل شده سطح آب درون خاک را در ۹۰ سانتی متری نگهدارد تا گیاه بتواند بخوبی از آب مویینه ای استفاده کند، از بیش زهکشی^۱ جلوگیری شود و نیز فرصت کافی برای تبدیل نیترات به نیتريت وجود داشته باشد. از سوی دیگر، چنانچه سطح ایستابی پایین تر از مقدار خیز مویینه ای باشد، نیاز آبی گیاه تأمین نخواهد شد و گیاه با تنش آبی روبه رو می شود. بدیهی است که سطح آب در همه نقاط بین دو سازه کنترل را نمی توان در ۹۰ سانتی متری نگاه داشت. چنانچه مقدار رواداری بین دو سازه پیاپی ۳۰ سانتی متر در نظر گرفته شود و سطح ایستابی در پایین دست سازه بالایی ۹۰ سانتی متر باشد، سطح ایستابی در بالادست سازه پایینی به ۶۰ سانتی متر می رسد. ممکن است

۱. Overdrainage

چنین سطحی از دیدگاه طراح مطلوب نباشد. از سوی دیگر، چنانچه سطح ایستابی در بالادست سازه پایینی در ۹۰ سانتی متری تثبیت شود، سطح ایستابی در پایین دست سازه بالایی به ۱۲۰ سانتی متری خواهد رسید که گیاه را با کم آبی روبه رو خواهد کرد. در اینجا طراح باید تصمیم بگیرد که سطح ایستابی را در چه عمقی تثبیت کند. چنانچه این رواداری به ۲۰ سانتی متر کاهش یابد، یکنواختی آب در دسترس بهبود می یابد، ولی تعداد سازه های مورد نیاز بیش تر و مدیریت زهکشی دشوارتر می شود. از این رو، طراح باید با توجه به همه عوامل و پیامدهای آنها و بویژه بازگشت شوری خاک تصمیم گیری کند.

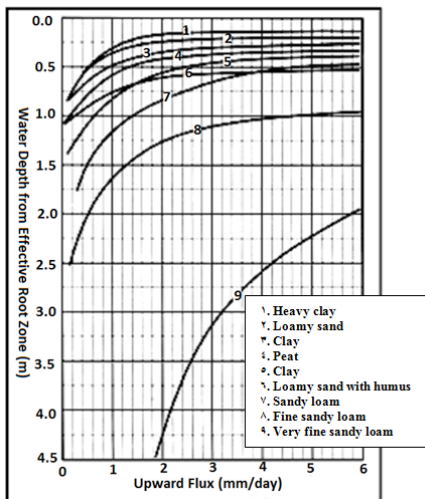
در مناطق مرطوب با خاک سنگین و خیز مویینه ای بیش تر، مدیریت سطح ایستابی دشوارتر و در مناطق خشک و خاک های سبک، کنترلش آسان تر است. در مناطق مرطوب که درصد زیادی از بارندگی در طول فصل رشد و در ابتدای کاشت گیاه ریزش می کند، بالانگهداشتن سطح ایستابی می تواند باعث کاهش گسترش ریشه گیاه شود که در دوره خشک توان جذب گیاه از عمق خاک را کاهش می دهد و بر تنش خشکی می افزاید.

۴- برآورد مقدار کاهش آب ورودی به مزرعه

همان گونه که گفته شد، زهکشی کنترل شده مقدار آب مورد نیاز مزرعه را کاهش می دهد. علت اصلی این کاهش استفاده گیاه از آب زیرسطحی ای است که در اثر خیز مویینه ای به ریشه گیاه می رسد و گیاه از آن استفاده می کند. این مقدار به فاصله سطح ایستابی تا عمق مؤثر ریشه و بافت خاک بستگی دارد. کیفیت آب خاک نیز نقش بسیار مهمی دارد. برای برآورد این مقدار می توان از شکل ۱۰ استفاده کرد. جدول ۲ نیز می تواند به عنوان راهنمای اولیه به کار رود. برای نمونه، اگر عمق آبی با کیفیت مناسب در $1/6$ متری باشد و آب نیز کیفیت مناسبی داشته باشد، نیشکر می تواند تا ۶۳ درصد آب مورد نیازش را از آب زیرزمینی به دست آورد. معنای این سخن این نیست که در خوزستان نیز می توان این طور برنامه ریزی کرد، زیرا کیفیت آب زیرسطحی در این استان نامناسب است. بنابراین از ارقام این جدول باید با احتیاط استفاده کرد.

جدول ۲- درصد جذب رطوبت توسط گیاه از سطح ایستابی کم عمق

گیاه	عمق سطح ایستابی (سانتی متر)	کیفیت آب زیرزمینی (دسی زیمنس بر متر)	درصد استفاده از آب زیرزمینی
ذرت	۶۰	۰ - ۶	۵۸ - ۰
ذرت	۱۰۵	۰ - ۶	۲۹ - ۰
پنبه	۹۰	۰/۹ - ۶	۳۷
پنبه	۲۷۰	۰/۹ - ۶	۲۸
نیشکر	۱۶۰	کم تر از ۱	۶۳
یونجه	۹۰	کم تر از ۱	۵۷ - ۲۸
گندم	۹۰	۰/۵ - ۵/۲	۵۳

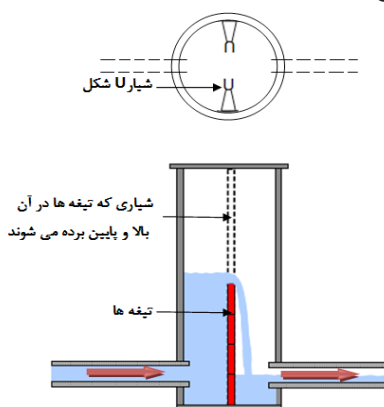


شکل ۱۰- مقدار آبی که گیاه می تواند از آب زیرسطحی در بافت های مختلف خاک استفاده کند (محور افقی، جریان مویینه ای بر حسب میلی متر در روز است و محور قائم، عمقی که رطوبت از ناحیه مؤثر ریشه می تواند جذب شود، بر حسب متر).

سازه های کنترل زهکشی

در برخی کشورها از سازه های پیش ساخته کنترل سطح ایستابی استفاده می شود. در ایران که چنین سازه هایی وجود ندارند، باید چاهک های بازرسی را طوری اصلاح کرد که بتوان از آنها به این منظور استفاده کرد. در شکل ۱۱ و ۱۲ نمونه هایی از سازه زهکشی کنترل شده که می تواند کارایی لازم را داشته باشد، نشان داده شده است.

در طرح های جدید که محل سازه ها را می توان متناسب با نیاز انتخاب کرد، بهتر است سازه ها دست کم دو برابر عمقشان از زهکش جمع کننده فاصله افقی داشته باشند.



شکل ۱۱- نمونه ای ساده از سازه زهکشی کنترل شده قابل استفاده در کشور (میل گردها نشان داده نشده اند)



شکل ۱۲- نمونه پیش ساخته سازه زهکشی کنترل شده

۱- تعداد و محل کارگذاری سازه های کنترل زهکشی

در مرحله طراحی، مهم ترین پرسش این است که سازه کنترل سطح ایستابی در کجا قرار گیرد تا بتوان سطح آب زیرسطحی را در بالادستش با نوسانی معین کنترل کرد. بی تردید هرچه تعداد سازه ها کم تر باشد، بهره برداری ساده تر خواهد بود. عوامل مؤثر در محل کارگذاری سازه عبارت اند از:

* توپوگرافی و شیب متوسط سطح زمین در جهت لترال؛

* شیب زمین در جهت زهکش جمع کننده (خواه روباز و خواه لوله ای) باشد، یعنی شیب چنان باشد که بتوان با کمک یک سازه، دو یا چند لترال را به طور همزمان کنترل کرد؛

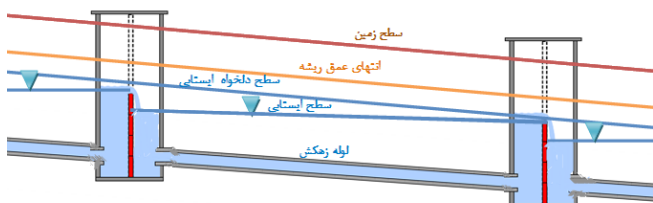
* رواداری در تغییر سطح ایستابی، یعنی طراح چه مقدار تغییر سطح آب در زیر خاک در فاصله میان دو سازه پیاپی را مجاز می داند؛

* مدت زمان واکنش خاک به تغییر سطح آب در سازه، یعنی پس از بالا یا پایین بردن سطح آب در سازه بر اثر آبیاری یا بارندگی، چه مدت طول می کشد تا سطح آب زیرسطحی به مقدار مورد نظر برسد؛

* تعداد سازه ها، امکان مدیریت آنها و توجیه اقتصادی طرح.

۲- سازه کنترل روی لترال

مهم ترین عامل مؤثر بر جانمایی محل سازه روی لترال، شیب متوسط سطح زمین است. در شبکه منظم زهکشی زیرزمینی، زهکش های لترال از یک یا دو سو به جمع کننده وارد می شوند. شکل ۱۳ وضعیت یک سویه را نشان می دهد.



شکل ۱۳- محل سازه های کنترل سطح آب زیر سطحی در لترال (نوشته ها هم رنگ خط ها هستند)

در زهکش یک سویه، فاصله بین سازه های روی لترال از رابطه زیر به دست می آید:

$$L_1 = H_1 / S_1 \quad (۱)$$

که در آن:

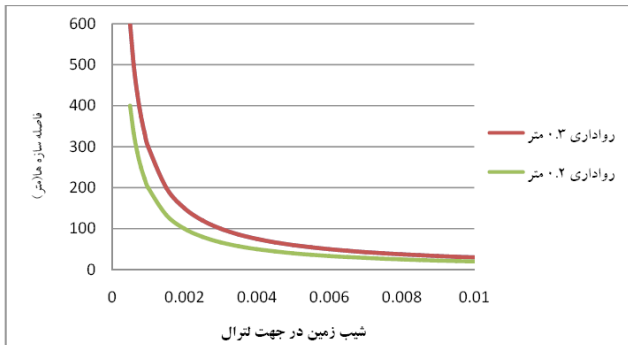
L_1 = فاصله بین سازه های لترال (متر)؛

S_1 = شیب طبیعی سطح زمین در راستای لترال (اعشاری)؛

H_1 = رواداری سطح آب در زیر سطح زمین (متر).

شکل ۱۴ نتایج محاسبه فاصله سازه ها از رابطه ۱ را برای دو مقدار فرضی رواداری $۰/۳$ و $۰/۲$ متر نشان می دهد. آشکار است که هرچه شیب زمین بیش تر باشد، سازه های زهکش کنترل شده باید به یکدیگر نزدیک تر باشند. در این حالت، مدیریت سطح ایستابی دشوارتر می شود و هزینه ها افزایش می یابد.

در لترال هایی که از دو طرف به زهکش جمع کننده تخلیه می شوند، همواره لترال پایین دست برخلاف شیب طبیعی زمین است؛ مگر اینکه زمین نیز در عملیات تسطیح به شکل کاو در آمده باشد. در چنین وضعیتی نمی توان زهکش کنترل شده را به کار برد. ازاین رو نباید فراموش کرد که زهکشی کنترل شده را تنها می توان در زمین هایی به کار برد که زمین در راستای حرکت آب در لترال دارای شیب باشد.



شکل ۱۴- فاصله سازه های کنترل سطح آب در شیب های مختلف سطح زمین در راستای لترال

چنانچه مدیریت دقیق روی هر یک از لترال ها مورد نظر باشد، توصیه می شود که از سازه کنترل در انتهای لترال یا در محل اتصال لترال به جمع کننده استفاده شود.

۳- سازه کنترل روی جمع کننده

در صورتی که شیب مزرعه در راستای زهکش جمع کننده کم باشد، با نصب یک سازه کنترلی روی جمع کننده ممکن است بتوان دو یا چند لترال را به طور همزمان کنترل کرد. شرایط لازم برای تحقق چنین گزینه‌ای آن است که یک محصول کشت شود یا گیاهانی کشت شوند که از نظر عمق ریشه نیاز به زهکشی یکسانی دارند و زمان کاشت و برداشتشان یکی است. در این حالت نیز محل مناسب نصب سازه، تابع شیب زمین در راستای زهکش جمع کننده (خواه لوله‌ای و خواه روباز) است. چنانچه جریان اندکی در جمع کننده وجود داشته باشد به نحوی که بتوان جریان بالادست سازه را نزدیک به عرض در نظر گرفت، فاصله مناسب بین این سازه‌ها نیز همانند سازه‌های روی لترال محاسبه می‌شود:

$$L_c = H_c / S_c \quad (۲)$$

که در آن:

L_c = فاصله بین سازه‌های روی زهکش جمع کننده (متر)؛

S_c = شیب طبیعی سطح زمین در راستای زهکش

جمع کننده (اعشاری)؛ و

H_c = رواداری سطح آب در زهکش جمع کننده
(متر) است.

در این صورت، سازه های انتهایی لترال ها باید از حالت کنترل شده خارج شوند و کار کنترل سطح آب دو یا چند لترال توسط سازه روی زهکش جمع کننده اجرا شود.

چنانچه در هر لترال از چند سازه کنترلی استفاده شده باشد، نمی توان از سازه کنترلی روی زهکش جمع کننده استفاده کرد. در این حالت، اختلاف سطح آب در دو طرف سازه کنترلی روی لترال (۲۰ تا ۳۰ سانتی متر که به عنوان رواداری از آن یاد شد) مانع کنترل دلخواه سطح ایستابی در بالادست سازه می شود و از این رو می توان استفاده از سازه های کنترل روی زهکش جمع کننده را به شرایط زیر منوط دانست:

- * تک کشتی در زمین های زیر کنترل؛
- * شیب کم در راستای زهکش جمع کننده؛
- * داشتن تنها یک سازه کنترل کننده روی هر یک از لترال ها؛
- * خارج کردن سازه انتهایی لترال از حالت کنترل شده.

در شالیزارها که شیب زمین به صفر نزدیک است و سطح ایستایی زیر سطح خاک کنترل نمی شود و قطعات نیز طول و عرضی نزدیک به ۱۰۰ و ۳۰ متر دارند، چنانچه مزرعه به صورت پلکانی آرایش نشده باشد، ایستگاه کنترل می تواند به یک باره سطح بزرگی را زیر پوشش قرار دهد.

به نظر می رسد که جمع شدن تمامی این شرایط در یک منطقه دشوار باشد، ولی در ایران در مزارع یکپارچه تک محصولی نیشکر در زمین های بسیار کم شیب جنوب خوزستان یا اراضی شالیزاری مسطح زمین های پست^۱ شمال کشور می شود از زهکشی کنترل شده استفاده کرد.

چنانچه جریان در زهکش جمع کننده به اندازه ای باشد که نتوان جریان بالادست آن را عرضی دانست، باید اختلاف تراز آب در فاصله بین دو سازه پیاپی نیز که از شیب سطح آب ناشی می شود، در نظر گرفته شود. این شیب لزوماً برابر شیب کف زهکش نیست و مقدارش به بده جریان، ضریب زبری جدار و مشخصات هندسی زهکش جمع کننده بستگی دارد. بده جریان هم به عوامل بسیاری مانند مقدار آبیاری،

۱. Low land

بارش، شیوه کنترل جریان در لوله های زهکش و... بستگی دارد و برآوردش آسان نیست. به عنوان یک تخمین مهندسی پیشنهاد می شود تا در رابطه شماره ۲ شیب سطح آب برابر نصف شیب زمین در راستای زهکش جمع کننده یا نصف شیب کف زهکش در نظر گرفته شود. به این ترتیب می توان رابطه ۲ را به شکل زیر اصلاح کرد:

$$Lc = 2 Hc / Sc \quad (3)$$

رابطه ۲ در حالتی کاربرد دارد که جریان زهکش جمع کننده کم باشد و شیب سطح آب را بتوان نزدیک به صفر دانست. رابطه ۳ را می توان در حالتی به کار برد که جریان در سازه بالادست ریزش می کند یا اختلاف ارتفاعی بین جریان بالادست و پایین دست سازه وجود دارد. بدیهی است چنانچه آب از روی سازه ها به صورت مستغرق و غیرریزشی جریان یابد، سازه های کنترل زهکشی روی زهکش جمع کننده کارایی خود را از دست می دهند.

۴- زمان واکنش خاک به تغییر سطح آب در سازه کنترل

هنگامی که سطح آب در سازه کنترل کننده بالا یا پایین برده شود، مدتی طول می کشد تا واکنشش

به نقطه میانی وسط دو زهکش لترال برسد. سرعت انتقال آب درون جمع کننده و لترال (چه از بالادست به پایین دست یا برعکس) زیاد طول نمی کشد و معمولاً از چند دقیقه تا یکی دو ساعت بیش تر نیست، اما سرعت حرکت آب در خاک تابع بار آبی، هدایت هیدرولیکی و فاصله زهکش های لترال است. هنگامی که از زهکشی کنترل شده استفاده می شود، در حقیقت بار آبی کم می شود و در نتیجه سرعت حرکت آب در خاک کاهش می یابد و از سرعت واکنش زهکش به بالا آمدن سطح آب (در اثر بالا آوردن آب در سازه کنترلی) یا پایین رفتن سطح آب (در اثر پایین بردن آب در سازه کنترلی) کاسته می شود. در برخی خاک ها این تأخیر ممکن است به چند روز برسد. در هر بار آبیاری نیز چنین شرایطی روی می دهد.

نمونه طراحی

داده ها

- * شیب لترال برابر ۰/۰۰۱؛
- * رواداری یا حد مجاز تغییر سطح ایستابی ۳۰ سانتی متر؛
- * طول لترال ۳۰۰ متر؛
- * فاصله بین لترال ها از هم ۸۰ متر؛
- * شیب زهکش جمع کننده ۰/۰۰۱؛
- * در زهکش جمع کننده جریان آب شدیدی وجود دارد، تاجایی که جریان از روی تیغه سازه مستغرق نیست.

حل و بحث

با استفاده از شکل ۱۰، فاصله مناسب سازه های کنترل ۳۰۰ متر خواهد بود.

از آنجایی که طول لترال ۳۰۰ متر است، یک سازه در انتهای هر لترال در نظر گرفته می شود.

در این حالت، باتوجه به رابطه ۳ و با فرض شیب زهکش جمع کننده برابر ۰/۰۰۱، چنانچه فرض شود زه آبی نیز در آن جریان ندارد، می توان ۳ لترال پیاپی را با یک سازه کنترل کننده روی زهکش جمع کننده مدیریت کرد، مشروط بر آنکه تغییراتی

برابر ۳۰ سانتی متر در سطح آب زیرسطحی از دیدگاه طراح پذیرفته شود.

چنانچه فرض شود که در زهکش جریان شدیدی وجود دارد ولی مستغرق نیست، با فرض تغییرات مجاز ۳۰ سانتی متری می توان ۷ لترال پیایی را با یک سازه کنترل کننده روی زهکش جمع کننده مدیریت کرد.

اجرا

در اجرای زهکشی کنترل شده، برای محاسبه عمق و فاصله زهکش ها و نیز قطر و نوع آنها از ضوابط عام زهکش های زیرزمینی پیروی می شود. تنها اختلاف اجرایی در سازه کنترل سطح ایستابی است. نوع سازه، بسته به اینکه در زهکش روباز به کار برده شود یا اینکه در زهکشی زیرزمینی لوله ای استفاده شود، متفاوت است. در زهکش های روباز، متداول ترین و ساده ترین ابزار استفاده از سرریز است که می تواند چوبی، فلزی یا لاستیکی باشد. در زهکشی زیرزمینی، رایج ترین وسیله استفاده از چاهک بازدید^۱ و ایجاد دو شیار L شکل روبه روی یکدیگر در دیواره آن است. تیغه ها در داخل شیار به

۱. Manhole

پایین رانده می شوند یا بیرون آورده می شوند. در برخی کشورها این سازه ها به صورت پیش ساخته به فروش می رسند. تیغه های آب بند به طور معمول چوبی یا پلاستیکی هستند. برای آب بندی بهتر، بالا و پایین آنها را به شکل T می سازند که در هم چفت شوند (شکل های ۱۱، ۱۲ و ۱۵).



شکل ۱۵- سازه زهکش کنترل شده

مدیریت و روش های بهره برداری

صرف نظر از نوع سرریز و مصالح به کاررفته برای ساخت ابزار کنترل سطح ایستابی، سهولت تنظیم و استفاده از آن ضروری است. علاوه بر آن، ابزار کنترل باید توان انتقال بیش ترین زه آب را داشته باشد. می دانیم که واکنش خاک به تغییر سطح ایستابی

با ابزار کنترل زهکش کند است؛ لذا مهم ترین تصمیم در زهکشی کنترل شده، زمان بالا یا پایین بردن ابزار کنترل خروجی برای تنظیم سطح ایستابی مورد نظر است تا ضمن جلوگیری از ماندابی شدن خاک، بیش ترین استفاده از رطوبت موجود در آن با در نظر گرفتن عمق ریشه صورت پذیرد. این موضوع بویژه در خاک های دارای بافت سنگین اهمیت دارد؛ زیرا اگر تا زمان مشاهده یا اندازه گیری سطح ایستابی منتظر بمانیم، شاید شرایط نامطلوب ماندابی ایجاد شود. دقت کنترل در زهکشی، بسته به نوع محصول، می تواند متفاوت باشد. در مناطق مرطوب، عمق کنترل بسته به مقدار بارندگی، تبخیر و تعرق و حجم زه آب ممکن است در هر روز متفاوت باشد. در مناطق خشک، این حساسیت از دیدگاه بارندگی و در نتیجه از نظر ماندابی شدن چندان زیاد نیست و تغییر سطح تیغه ها به صورت هفتگی یا دو هفته یک بار انجام می شود.

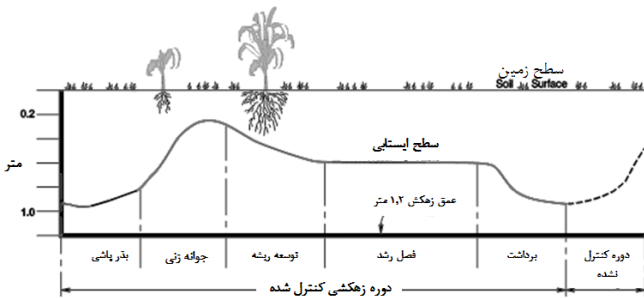
در زیر چند نمونه از نحوه مدیریت در مناطق مختلف ارائه شده است.

۱- مناطق مرطوب

تأمین بخشی از رطوبت مورد نیاز در محیط ریشه در حدی که توسعه ریشه را محدود نسازد، کلید موفقیت زهکشی کنترل شده است. برای مثال، در شکل ۱۶ می بینید که پیش از خاک ورزی بهاره و کاشت بذر، سطح ایستابی تا حد ۷۵ تا ۱۰۰ سانتی متر پایین آورده می شود. پس از کاشت بذر، سطح ایستابی باید قدری بالا بیاید (حدود ۳۰ سانتی متری سطح خاک) تا با هدایت موینه ای آب، بستر بذر مرطوب شود. پس از آن، سطح ایستابی را متناسب با توسعه ریشه می توان بتدریج (تا حدود ۴۰ سانتی متری سطح خاک) پایین آورد. نکته حائز اهمیت در دوره رشد گیاه و توسعه ریشه آن است که سطح ایستابی نباید آنقدر بالا باشد که مانع توسعه حداکثری ریشه شود و گیاه را در برابر تنش های آتی رطوبتی آسیب پذیر سازد. پس از طی دوره توسعه ریشه، سطح ایستابی باید در طول فصل رشد ثابت نگهداشته شود. در مدیریت آبیاری در طول فصل رشد، بارندگی ها باید به حساب بیایند و در صورت لزوم، آب اضافی از خاک خارج شود. اگر سطح ایستابی بیش از ۱۵ سانتی متر بالاتر از حد مطلوب

قرار گیرد، زهکشی آزاد لازم است. پیش از برداشت محصول و به منظور افزایش قابلیت رفت و آمد، سطح ایستابی باید به ۷۵ تا ۱۰۰ سانتی متری رسانده شود. همچنین، برای جلوگیری از وارد شدن رسوب یا آلاینده ها به لوله زهکش، سطح ایستابی باید به آهستگی (۳۰ سانتی متر در روز) پایین آورده شود. پس از برداشت محصول هم سیستم باید در حالت زهکشی آزاد قرار گیرد.

در فصل بارندگی، سرریز در نزدیکی سطح خاک قرار می گیرد تا حجم زه آب خروجی به طور ناگهانی افزایش نیابد. پس از آن لازم است سرریز به آهستگی (۱۵ سانتی متر در روز) پایین آورده شود تا نیم رخ خاک بتدریج و یکنواخت تخلیه شود و ظرفیت نگهداری آبی آن برای بارندگی بعدی به حد کفایت برسد.



شکل ۱۶- وضعیت مطلوب سطح ایستابی در طول فصل رشد

۲- مناطق کم آب

در مناطقی که آب گران و کمیاب است، زهکشی کنترل شده با کاهش مصرف آب می تواند ارزش خود را نشان دهد. در این مناطق برای حفظ مقدار بیش تری از آب موجود بهتر است سطح ایستابی بلافاصله پس از کاشت بالا آورده شود. عمق سطح ایستابی باید به اندازه ای باشد که آب کافی به محیط ریشه برسد، ولی خاک به حالت اشباع درنیاید و توسعه ریشه محدود نشود.

۳- مناطق خشک و نیمه خشک

استفاده پایدار از سیستم زهکشی کنترل شده در مناطق خشک و نیمه خشک به مدیریت شوری در ناحیه ریشه بستگی دارد. نکته مهم آن است که

مقاومت گیاهان به شوری بیش تر از آن است که تصور می شود، مشروط بر آنکه در مراحل اولیه جوانه زنی و رشد، بستر بذر شور نباشد. شوری آب زیر سطحی نیز به دلیل عدم اختلاط کامل آب آبیاری با جبهه رطوبتی و آب زیرزمینی، در اعماق مختلف و زمان های متفاوت در هر دوره آبیاری متغیر است و متناسب با افزایش عمق سطح ایستابی افزایش می یابد. این شاید یکی از علل تداوم کشاورزی فاریاب در این مناطق، برغم سطح ایستابی بالا و شوری خاک باشد. لایه های بالایی سطح ایستابی که شوری کم تری دارند، نقش بیش تری در صعود مویینه ای دارند و از این روست که خطر آسیب شوری به گیاه کاهش می یابد.

تحقیقات انجام شده در آمریکا و استرالیا نشانگر امکان پذیری مدیریت مؤثر سطح ایستابی در اراضی فاریاب با ابزارهای مختلف کنترل سطح ایستابی است که باعث کاهش حجم زه آب و املاح در خروجی زهکش ها شده است. به مشکل انباشت نمک در ناحیه ریشه هم باید توجه کرد؛ هرچند، نتایج برخی تحقیقات نشان داده است که با مدیریت دقیق آب این مشکل نیز برطرف می شود.

ارتفاع نصب بهینه ابزار کنترل سطح ایستابی به نوع گیاه و مرحله رشد آن و نوع خاک بستگی دارد. برای مثال، در خاک‌های شنی یا گیاهان با ریشه سطحی، تیغه آب‌بند در ارتفاعی بالاتر قرار می‌گیرد. برای گیاه ذرت در اغلب خاک‌ها ارتفاع مناسب ۴۵ تا ۷۵ سانتی‌متر است. تعیین دقیق سطح بهینه ایستابی در هر زمان مستلزم پایش چندساله سیستم و مقایسه مقدار محصول در این قطعات در مقایسه با قطعاتی است که در آنها زهکشی متداول انجام می‌شود.

منابع

۱- اکرم، م. و اکرم، س. ۱۳۸۳. زهکشی کنترل شده، کورسویی برای بهبود راندمان آبیاری در اراضی زهکشی شده ایران. مجموعه مقالات سومین کارگاه فنی زهکشی. صفحات ۲۱-۳۲.

۲- تاجیک، ف.، اکرم، م. و اشرفی، ش. ۱۳۹۳. محل مناسب نصب سازه برای کنترل سطح ایستابی در زهکشی کنترل شده. مجموعه مقالات هشتمین کارگاه فنی زهکشی و محیط زیست.

Abbott, C. L., Lawrence, P., Pearce, G. R. and AbdelGawad, S. 2002. Review of the potential for controlled drainage around the world. DFID, KAR Project R7133. Report OD 146, HR Wallingford, UK.

Abbott, C. L., Abdel-Gawad, S., Wahba, M. S. and Cascio, A.L. 2001. Field testing of controlled drainage, and verification of the WaSim simulation model. DFID, KAR Project R7133. Report AD/TN 122, HR Wallingford, UK.

AbdelDaïem, S., Hoevenaars, J. Mollinga, P. P., Scheumann, W., Slootweg, R. and van Steenberg, F. 2005. Agricultural drainage: Towards an integrat-

ed approach. *Irrigation and Drainage Systems*. 19, 71-87.

Van Achthoven, T., Merabet, Z., S. Shalaby, K. and van Steenberg, F. 2004. Balancing productivity and environmental pressure in Egypt: Toward an Interdisciplinary and Integrated Approach to Agricultural Drainage. World Bank Agriculture and Rural Development. Working Paper 13.

Anonymous. 2006. Design, Installation and operation of water table management systems for subirrigation /controlled drainage in humid regions. ASABE standards, ASAE EP 479, 1990 (R2005).

Ayars, J. E. 1996. Managing irrigation and drainage systems in arid areas in the presence of shallow ground water: Case studies. *Irrigation and Drainage System*. 10, 227-244.

Ayaes, J. E. and Evans, R. G. 2015. Subsurface drainage- What is next? *Journal of Irrigation and Drainage*, DOI: 10.1002/ird.1893

Ayars, J. E., Christen, E. W. and Hornbuckle, J. W. 2006. Controlled drainage for improved water man-

agement in arid regions irrigated agriculture. Agricultural Water Management. 86, 128-139.

Ayars, J. E., Grismer, M. E. and Guitjens J. C. 1997. Water quality as design criterion in drainage water management system. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 123, 148-153.

Ayars, J. E., Christen, E. W., Soppe, R. W. and Meyer, W. S. 2005. The resource potential of in-situ shallow ground water use in irrigated agriculture: A Review. Irrigation Science. 24, 147-160.

Bahceci, I., Cakir, R., Nacar, A. S. and Bahceci, P. 2008. Estimating the effect of controlled drainage on soil salinity and irrigation efficiency in the Harran plain using SaltMod. Turkish Journal of Agriculture and Forestry. 32: (2) 101-109.

Borin, M., Bonaiti, G. and Giardini. L. 2001. Controlled drainage and wetland to reduce agricultural pollution: A lysimetric study. Journal Environmental Quality. 30,1330-1340.

British Columbia Ministry Of Agriculture And Food. 1998. Controlled drainage/Subirrigation,

drainage fact sheet, No.564.000-1.

British Columbia Drainage Fact Sheet. 2000. Benefits of drainage, B.C. Ministry of agricultural and food, Canada. Fact sheet No.528.000-1.

Drainage Research Institute (DRI). 2002. "Evaluation of Controlled Drainage System Using

Participatory Rapid Appraisal: Rice Season 2000". DRP-II, Technical Report Number 119, NWRC, MWRI. Cairo, Egypt.

Evans, R. O. and Fausey, N. R. 1999. Effects of inadequate drainage on crop growth and yield. In: Skaggs, R.W. and van Schilfgaarde, J. (Eds.), Agricultural drainage. pp. 13-54.

Evans, R. and W. Skaggs. 1996. Operating controlled drainage and subirrigation systems. North Carolina Cooperative Extension Service, AG 356.

Evans, R., Skaggs, W. and Sneed R. E. 1996a. Economics of controlled drainage and subirrigation systems. North Carolina Cooperative Extension Service, AG 397.

Evans, R., Gilliam, J. W. and Skaggs, W. 1996b. Controlled drainage management guidelines for improving drainage water quality. North Carolina Cooperative Extension Service, AG 443.

Evans, R., Skaggs, W. and Gilliam, J. W. 1995. Controlled versus conventional drainage effects on water quality. *Journal of Irrigation and Drainage*. 121(4): 271-276.

FAO. 2007. Egypt's experience in irrigation and drainage research uptake. Final Report. Rome, Italy.

Fouss, J. L., Evans, R. O., Thomas, D. L. and Blecher, H. W. 1999a. Design of controlled drainage and subirrigation facilities for water table management. In: Skaggs, R.W. and van Schilfgaarde, J. (Eds.), *Agricultural drainage*. pp. 719-742.

Fouss, J. L., Evans, R. O., Thomas, D. L. and Blecher, H. W. 1999b. Operation of controlled drainage and subirrigation facilities for water table management. In: Skaggs, R.W. and van Schilfgaarde, J. (Eds.), *Agricultural drainage*. pp. 743-763.

Frankenberger, J., Klavivko, E., Sands, G., Jaynes,

D., Fausey, N., Helmers, M., Cooke, R., Strock, J., Nelson, K. and Brown, L. 2006. Questions and answers about the drainage water management in the Midwest. Purdue University Extension Publ. WQ – 44.

Gilliam, J. W., Baker, J. L. and Reddy, K. R. 1999. Water quality effects of drainage in humid regions. In: Skaggs, R.W. and van Schilfgaarde, J. (Eds.), *Agricultural Drainage*. pp. 801-830.

Gilliam, J. W., Osmond, D. L. and Evans, R. O. 1997. Selected Agricultural Best Management Practices to Control Nitrogen in the Neuse River Basin. North Carolina Agricultural Research Service Technical Bulletin 311, North Carolina State University, Raleigh, NC.

Hornbuckle, J., Christen, E. W. Ayars, J. E. and Faulkner, R. D. 2003. Controlled water table management as a strategy for reducing salt loads from subsurface drainage under perennial agriculture in semi-arid Australia, 9th Int. Drainage Workshop.

Parsons, J. E. 1999. Simulation models for drain-

age water quality. In: Skaggs, R.W. and van Schilfgaarde, J. (Eds.), Agricultural Drainage. pp. 501-535.

Parsons, J. E., Skaggs, R.W. and Doty, E.W. 1990. Simulation of controlled drainage in open – ditch drainage systems. Agricultural Water Management. 18, 301-316.

Skaggs, R. W. 1999. Water table management: Subirrigation and controlled drainage. In: Skaggs, R.W. and J. vanSchilfgaarde, J. (Eds.), Agricultural Drainage. pp. 695-718.

Skaggs, R. W., Fausey N. R., and Evans, R. O. 2012. Drainage water management. Journal of Water and Soil Conservation. 67(6): 474-484.

Skaggs, R. W. and vanSchilfgaarde, J. 1999. Introduction to agricultural drainage. In: Skaggs, R.W. and van Schilfgaarde, J. (Eds.), Agricultural Drainage. pp. 3-10.

Smeltz, H. L., 2004. Water quality assessment of a degraded stream prior to restoration and nitrate reduction through controlled drainage. M.S. Thesis,

North Carolina State University.

Soppe, R. W. O., Ayars, J. E., Christen, E. W. and Shous P. J. 2003. Irrigation management to optimize controlled drainage in a semi-arid area. 9th International Drainage Workshop. Utrecht, the Netherlands.

Vlotman, W. F. and Jansen, H. C. 2003. Controlled drainage for integrated water management. 9th International Drainage Workshop. Utrecht, The Netherlands.

Vlotman, W. F., Jansen, H. J. and Snellen, W. B. 2002. Controlled Drainage: an additional paradigm for integrated water management. In: Visser, S.J. (Ed.), Modernization of Water Management. Technological and institutional improvements in irrigation and drainage. Proceedings of the 7th Netherlands National ICID Symposium (NETHCID), April 2002, Haskoning, Nijmegen, The Netherlands. pp. 65-84.

World Bank. 2005. Investing in controlled drainage: Innovation profile 5.2, In: Shaping the future of water for agriculture, A sourcebook for Investment in agricultural water management, the World Bank, Washington DC.