سال چهارم، شماره ۲، زمستان ۱۳۹۶، صفحات ۶۹ تا ۸۰
نشریه آب و توسعه پایدار

2018, Vol.4, No.2, Pages 69 to 80
Journal of Water and Sustainable Development

مروری بر تاریخچه ابداعات و نوآوری‌ها در زمینه آبیاری زیرسطحی

شهریار باستانی

دکتری آبیاری، موسسه پژوهشی آب و توسعه پایدار فلات، کرمان.

E-Mail: bastani1958@gmail.com
تاریخ دریافت: ۹۵/۰۹/۲۸
تاریخ پذیرش: ۹۶/۰۱/۲۳

چکیده

این مقاله به بررسی تاریخچه "نوآوری و ابداعات" انجام شده در سطح کشورهای مختلف دنیا در زمینه آبیاری زیرسطحی می‌پردازد. در ابتدای مقاله تفاوت‌های موجود بین روش‌های آبیاری زیرزمینی و زیرسطحی تبیین و سپس مسائل فنی ابداعات صورت گرفته از ابتدای تاریخچه مکتوب تحقیقات در زمینه آبیاری زیرسطحی تاکنون موردبحث قرار می‌گیرد. ضمن تشریح کلیه فعالیت‌های انجام‌شده برای ساخت انواع لوله مورد استفاده در آبیاری زیرسطحی، تلاش گردیده تا مهم‌ترین موانع فنی که مانع گسترش این روش‌ها، از جمله روش‌های موجود در بازار چون قطره‌ای زیرسطحی، تراوای لاستیکی و کیس شده‌اند، تشریح گردند. نظر به محدودیت موجود برای ذکر کلیه مطالب فنی مرتبط با روش‌های مختلف و برای درک بهتر خواننده از قابلیت هر کدام از روش‌ها، به پایان هر قسمت، مطلبی تحت عنوان "ارزیابی نگارنده" اضافه شده است. در بخش آخر مقاله نیز به اقدامات انجام شده برای ابداع "آبیاری زیرسطحی با لوله‌های سفالی" اشاره گردیده است.

واژه‌های کلیدی: آبیاری زیرزمینی، آبیاری زیرسطحی تراوا، آبیاری زیرسطحی سفالی، آبیاری زیرسطحی قطره‌ای.

A Historical Review of Innovations and Developments of Subsurface Irrigation Systems

SH. Bastani

Ph.D. in Irrigation, Research Institute of Water and Sustainable Development of Plateau, Kerman ,Iran.

Email: bastani1958@gmail.com
Received: 18-12-2016
Accepted: 12-04-2017

Abstract

This paper contains a comprehensive historic review of attempts for innovation and development of Subsurface Irrigation Systems from the early stage in different countries and regions. Firstly, the differences between two irrigation systems namely: "Underground Irrigation" and "Subsurface Irrigation" has been clarified and then the technical problems within innovations from the start of written history research on subsurface irrigation has been discussed. Describing all activities performed by the subsurface irrigation pipes, this study attempts to introduce the most important technical barriers which prevent the distribution of subsurface irrigation systems including methods available in the market such as subsurface drip irrigation, Porous irrigation tubing, and KISSS. Due to the limitations to mention all the technical issues related to different methods of subsurface irrigation, and to better understand the ability of each method, "Researcher's Evaluation" is mentioned at the end of each part. The last part of this paper is attributed to the development process of a new subsurface irrigation system "Subsurface Irrigation with Clay Pipes".

Keywords: Underground irrigation, Porous irrigation tubing, Subsurface clay pipe irrigation, Subsurface drip irrigation.

DOI: 10.22067/jwsd.v4i2.60669

مقدمه

رشد جمعیت کره زمین، کاهش ذخایر آب زیرزمینی، افزایش خشکسالی‌های ناشی از تغییر اقلیم و به‌ویژه استفاده بی‌رویه منابع آبی، سبب بروز بحران کم‌آبی در بسیاری از کشورهای جهان شده است. از سوی دیگر اندک بودن نزولات آسمانی و مدیریت ضعیف استفاده از منابع آب زیرزمینی در کشورهای مناطق خشک و نیمه‌خشک سبب شده که عمده منابع آب شیرین در بخش کشاورزی مصرف گردد. این موضوع بهینه‌سازی مصرف آب در بخش کشاورزی را به دغدغه اصلی و فزاینده این کشورها تبدیل نموده است.

از سوی دیگر در کشورهای کم‌باران، شدت بالای تبخیر هوا سبب بروز تلفات شدید در اراضی تحت آبیاری شده است. مشکلی که رفع آن، تنها با انتقال روش آبیاری از سطح به زیرسطح خاک متصور است. لازمه برداشت موفقیت‌آمیز این قدم، شناخت همه‌جانبه مسائل فنی آبیاری زیرسطحی است. روشی که به دلیل گسترش نیافتن آن تاکنون کمتر در معرض دید کارشناسان و محققین قرار داشته؛ به‌گونه‌ای که در بسیاری از موارد حتی در کتب تخصصی خارجی نیز از روش "آبیاری زیرسطحی" ذکری به میان نمی‌آید و حداکثر به روش "آبیاری زیرزمینی" پرداخته می‌شود. در منابع فارسی‌زبان حتی واژه آبیاری زیرسطحی تا حدود سه دهه پیش به چشم نمی‌خورد، درحالی‌که بیش از یک قرن از شروع تحقیقات و کسب تجربه در زمینه آبیاری زیرسطحی می‌گذرد.

با وجود ابداع ده‌ها روش گوناگون آبیاری زیرسطحی در طول بیش از یک قرن اخیر، سطح تحت پوشش با آبیاری زیرسطحی علی‌رغم تشدید بحران آب، هنوز ناچیز است؛ زیرا یک روش آبیاری زیرسطحی ممکن است تحت شرایط کنترل‌شده در قطعات کوچک تحقیقاتی و در یک مقطع زمانی نسبتاً کوتاه، با نتایج امیدوارکننده‌ای همراه باشد، اما این موضوع لزوماً به معنی امکان استفاده عملی و اقتصادی از آن روش در کشاورزی نیست. در رابطه با آبیاری زیرسطحی تاکنون بررسی‌های مختلفی صورت گرفته است که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به مطالعات Cole (۱۹۷۱) و Camp (۱۹۹۸) اشاره کرد. Cole (۱۹۷۱) طیف وسیعی از مطالب فنی از هیدرولیک تا رشد علف‌های هرز و مباحث اقتصادی را در رابطه با تحقیقات انجام‌شده توسط محققین مختلف جمع‌بندی و گزارش با ارزشی ارائه نموده است؛ اما این بررسی صرفاً به تحقیقات انجام‌شده در آمریکا محدود می‌شود. Camp (۱۹۹۸) نیز به‌طور مفصل به نتایج تحقیقات آبیاری "زیرسطحی قطره‌ای" پرداخته و مسائل مختلفی را دسته‌بندی و بررسی نموده، ولی در این گزارش نامی از سایر سامانه‌های زیرسطحی عنوان نشده است. علاوه بر این در سال‌های اخیر مقالات دیگری نیز منتشر گردیده که موضوع آن‌ها ابداع یک سیستم جدید آبیاری نبوده است. به‌طور مثال Lamm (۲۰۱۴) فهرست مفصلی از مقالات منتشرشده در رابطه با آبیاری زیرسطحی قطره‌ای با محصولات مختلف و یا ارزیابی سامانه‌های موجود ارائه کرده است. همچنین در رابطه با مقالات انتشاریافته در ایران نیز زارعی و شهپری (۱۳۹۲) مروری بر برخی از تحقیقات انجام‌شده در ایران با روش‌های مختلف آبیاری سفالی داشته‌اند. این در حالی است که در مقاله پیش‌رو با نگاهی فنی و بدون پرداختن به مقالات منتشرشده، صرفاً تاریخچه مکتوب کلیه "ابداعات" از ۱۲۰ سال پیش تاکنون گزارش شده است. هدف این است که آشنایی علاقه‌مندان با روند تکاملی سامانه‌های آبیاری زیرسطحی سبب تعمیق شناخت نسبت به مرزهای فنی آبیاری زیرسطحی و پیشگیری از اتلاف فرصت‌ها در آزمودن آزموده‌ها در شرایط بحران فزاینده آب گردد.

روش آبیاری زیرزمینی[1]

این روش فقط در مناطقی که سطح سفره آب زیرزمینی نزدیک به سطح زمین باشد، قابل اجرا است و با روش آبیاری زیرسطحی که مخصوص مناطق کم‌آب است، تفاوت‌های زیادی دارد. در این روش از طریق وارد کردن آب به کانال‌های ایجادشده در زمین و یا جلوگیری از خروج جریان آب از یک سامانه زهکشی موجود در مزرعه در طول ماه‌های گرم سال، سطح آب زیرزمینی به حدی افزایش داده می‌شود که آب توسط نیروی مویینگی به سمت بالا حرکت نموده و منطقه ریشه را به اندازه کافی مرطوب نماید. به‌طور نمونه کشاورزان ساکن فلوریدا همه‌ساله آب آبیاری را در کانال‌های خاکی با عمق ۳۰ تا ۵۰ سانتی‌متر و فاصله ۶ تا ۳۰ متر از یکدیگر جاری می‌نمایند تا با نفوذ آب به عمق خاک سطح آب تا حدود ۴۰ تا ۶۰ سانتی‌متری سطح زمین افزایش یابد (Stanley و Clark، ۱۹۹۲). همچنین ممکن است بجای کانال‌های خاکی از لوله‌های زهکش سفالی با قطر داخلی ۷/۵ سانتی‌متر استفاده شود. Stein (۱۹۵۰) در رابطه با استفاده از شبکه لوله‌های زهکشی آبیاری زیرزمینی چنین می‌نویسد: "آبیاری زیرزمینی از دیرباز موضوعی شناخته‌شده بوده است، زیرا از ابتدای استفاده از لوله سفالی برای زهکشی، بعضاً تلاش شده که شبکه‌های زهکشی جهت آبیاری زیرزمینی نیز مورداستفاده قرار گیرند".

لوله‌های سفالی مورداستفاده برای آبیاری زیرزمینی همان لوله‌های سفالی مخصوص زهکشی بوده‌اند که فاقد تراوایی قابل‌توجه جداره می‌باشند. در هنگام زهکشی، آب از اتصال بین دو لوله به داخل وارد و در هنگام آبیاری آب از همان نقطه به بیرون جریان می‌یابد. Sack (۱۸۹۹) گزارش می‌دهد که در تحقیقات انجام‌شده با لوله‌های سفالی، آب از محل اتصالات این لوله‌ها به بیرون جریان می‌یافته و تلاش بر این بوده که از شبکه زهکشی علاوه بر آبیاری برای کوددهی مایع با کودهای شیمیایی محلول و یا ادرار گاو نیز استفاده شود. از دهه ۱۹۶۰ میلادی به‌تدریج لوله‌های پی‌وی‌سی خرطومی جایگزین لوله‌های سفالی شدند (Davis، ۱۹۶۷). امروزه لوله‌های پی‌وی‌سی، تنها نوع لوله مورداستفاده برای آبیاری زیرزمینی می‌باشند (Clark و Stanley، ۱۹۹۲).

روش‌های آبیاری زیرسطحی[۲]

آبیاری زیرسطحی روشی است که در آن منطقه ریشه گیاه بدون خیس‌شدن سطح خاک یا تلفات عمقی مرطوب می‌شود. در واژه‌شناسی انجمن مهندسان کشاورزی و بیولوژی آمریکا برای آبیاری زیرسطحی تعریف زیر[۳] ارائه گردیده است (ASAE، ۱۹۹۵):

روش‌های آبیاری زیرسطحی به لحاظ "هیدرولیک" و "آبدهی" متفاوت می‌باشند. به‌طور مثال هیدرولیک سامانه ممکن است به‌صورت نقطه‌ای[۴] باشد، همانند روش قطره‌ای زیرسطحی و روش کپسولی سفالی و یا به‌صورت خطی[۵] باشد، همچون روش تراوای لاستیکی و سامانه زیرسطحی با لوله‌های سفالی. نحوه آبدهی به خاک نیز ممکن است به‌صورت خیساندن و ایجاد شرایط اشباع (همانند روش قطره‌ای و روش تراوای لاستیکی) و یا به‌صورت نشت تدریجی رطوبت در شرایط غیراشباع (مانند روش‌های سفالی کم‌فشار) باشد.

سابقه ابداعات صورت گرفته در زمینه آبیاری زیرسطحی به بیش از یک قرن می‌رسد.

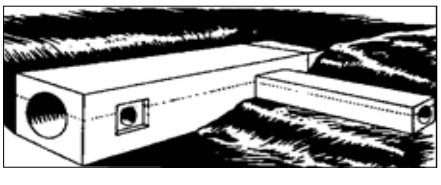
Degenhard در سال ۱۸۹۶ در شهر درسدن[۶] آلمان روشی برای آبیاری زیرسطحی ابداع نمود که در آن از لوله‌های سفالی با قطر داخلی ۵۰ میلی‌متر استفاده می‌شد (Vogler، ۱۸۹۶ و ۱۸۹۹). این لوله‌ها با اتصالات به یکدیگر وصل شده و در عمق ۲۵ تا ۴۰ سانتی‌متری به‌صورت دایره و یا مربع در زیر تاج درختان کارگذاری می‌شدند. هر حلقه از لوله‌های اطراف یک درخت به‌وسیله یک سه‌راهی به حلقه دیگر در اطراف درخت بعدی متصل و بدین ترتیب تا ده درخت با یك انشعاب آبیاری می‌شد. لوله‌های سفالی مورداستفاده بدون تخلخل و منفذ بوده و آب از محل اتصال آن‌ها خارج می‌شد؛ بنابراین منجر به تلفات عمقی و خیس‌شدن سطح خاک شده که کاربرد این روش برای مناطق کم‌آب را با مشکل مواجه می‌ساخت.

Plehn (۱۹۱۱) گزارشی از ابداعات انجام‌شده در زمینه آبیاری زیرسطحی در آمریکای شمالی ارائه کرد. در یکی از این سامانه‌ها، لوله‌هایی از جنس مواد متخلخل و همچنین سوراخ‌دار استفاده‌شده که بسته به نوع خاك در عمق ۳۰ تا ۶۰ سانتی‌متری کارگذاری می‌شدند. وی در گزارش خود به این نکته اشاره کرد که اگرچه این روش برای آبیاری تحت شرایط کمبود آب مناسب به نظر می‌رسد، اما با توجه به هزینه بسیار بالا، فقط در سبزی‌کاری آن‌هم با چند کشت در سال قابل توجیه اقتصادی است (Dorter، ۱۹۶۱). به‌ویژه اینکه استحکام لوله‌های مورداستفاده نیز به‌قدری کم بود که قسمت بزرگی از آن‌ها در حین حمل‌ونقل خرد می‌شد (House، ۱۹۱۸).

در سال ۱۹۱۲ تعاونی مزرعه‌داران تگزاس گزارشی از یك روش جدید برای آبیاری زیرسطحی منتشر نمود. در آن روش لوله‌های فرعی با قطر ۵ سانتی‌متر از یك لوله اصلی بتنی با قطر ۱۰ سانتی‌متر منشعب می‌شدند. فاصله لوله‌های فرعی از یکدیگر یك متر بود و روی قسمت فوقانی آن‌ها منافذ ریزی برای خروج آب تعبیه شده بود. روی هر منفذ درپوشی با فاصله کم قرار داشت تا امکان خروج آب از آن وجود داشته باشد (Meier، ۱۹۳۵). این سیستم در همان زمان به دلیل پرهزینه‌بودن و خطر نفوذ ریشه به درون منافذ آن مورد تردید قرار گرفت (Dorter، ۱۹۶۱).

Gerhardt در سال ۱۹۲۲ از یك سیستم آبیاری با لوله‌های متخلخل و سوراخ‌دار سفالی برای درختکاری در آمریکا خبر می‌دهد. طبق گزارش وی سوراخ کردن لوله‌ها سبب ورود گل‌ولای و ریشه گیاهان به درون آن‌ها می‌شده، به‌طوری‌که استفاده از این روش برای آبیاری موردقبول واقع نشد (Wagner، ۱۹۳۸).

در سال ۱۹۲۷ شرکت کلوك هون در ویسبادن[۷] آلمان یك روش آبیاری زیرسطحی جهت فروش به بازار ارائه نمود. این شرکت در ابتدا لوله‌های کاملاً متخلخلی تولید کرد که از مخلوط سیمان با شن درشت ساخته می‌شدند؛ اما به دلیل اینکه آبدهی لوله‌ها بیش از حد نیاز بوده و استقامت کافی نیز نداشتند، شکل لوله‌ها را تغییر داد. لوله‌های جدید با طول ۴۰ تا ۸۰ سانتی‌متر، مقطع خارجی چهارگوش ۶×۶ یا ۸×۸ سانتی‌متر و مقطع داخلی دایره‌ای ۳ سانتی‌متر تولید شده و فقط در قسمت بالا، تراوایی داشتند (شکل ۱). اتحادیه باغبانان آلمان این سامانه را در چند منطقه موردمطالعه قرار داد. نتایج این بررسی‌ها نشان داد که روش شرکت کلوك هون برای آبیاری، نمی‌تواند الگوی یکنواختی از توزیع آب داشته باشد. همچنین ضرورت کارگذاری لوله‌ها در فاصله بسیار کم، هزینه سیستم را بیش از حدی که دارای توجیه اقتصادی باشد افزایش می‌دهد (Meier، ۱۹۳۵).



شکل ۱- لوله‌های نیمه متخلخل به روش کلوك هون (Damnich، ۱۹۳۳)

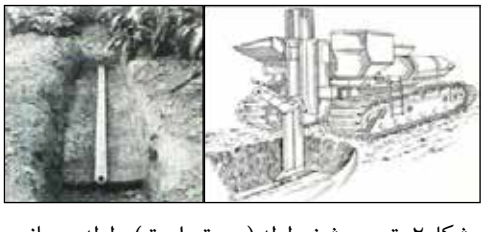
Korneff (۱۹۳۲) یك روش آبیاری زیرسطحی به نام آبیاری خودکار را پیشنهاد داد. در این روش از لوله‌های سفالی مخصوص زهکشی با قطر داخلی ۵۰ میلی‌متر استفاده شد که با اتصالاتی انعطاف‌پذیر از جنس کائوچو به هم متصل شده و در عمق ۲۰ تا ۳۰ سانتی‌متری، با فاصله یك متر یا بیشتر قرار داده می‌شدند. شبکه لوله‌ها سپس به یك منبع آب متصل شده و سطح آب درون منبع پایین‌تر از سطح آب لوله‌های سفالی تراوا قرار می‌گرفت تا فشار آب سبب تلفات به سمت عمق نشود. در ابتدا با تخلیه هوا از لوله‌ها، در سامانه، فشار منفی ایجادشده و سپس تحت تأثیر مکش خاک اطراف لوله، آب از داخل منبع به شبکه لوله‌ها که انتهای آن بسته بود وارد می‌شد. بسته به میزان خشکی و مکش خاك، آب از جداره متخلخل لوله‌ها به بیرون تراوش می‌کرد. با افزایش رطوبت خاك به‌تدریج مکش خاك

کاهش‌یافته و تراوش آب از جداره لوله قطع و بدین ترتیب از دادن آب اضافی به خاك جلوگیری می‌شد. گزارش شده که کارکرد این روش آبیاری به‌اصطلاح خودکار در عمل به دلایل مختلفی با اختلال مواجه گردید. ازجمله مشکلات این سامانه آزاد شدن گازهای محلول در آب (اکسیژن، گازکربنیك و ...) به دلیل ایجاد خلاء نسبی در داخل لوله‌ها بود که سبب پارگی ستون آب و بروز اخلال در آبیاری می‌شد. کاهش ابعاد پیاز رطوبتی و ذخیره رطوبتی خاك در منطقه ریشه؛ هزینه بالای سیستم به علت استفاده از لوله‌های زهکشی با قطر داخلی ۵۰ میلی‌متر که سبب افزایش وزن لوله مصرفی و هزینه اتصالات می‌گردد، از جمله محدودیت‌های این سامانه می‌باشد(Dorter، ۱۹۶۱).

کورنف پس از مدتی از ادامه کار با روش فوق منصرف و روش دیگری برای آبیاری زیرسطحی ابداع نمود که در آن کف کانال با یک‌لایه گل رس نفوذناپذیر پوشانده شده، سپس در این لایه شیار کوچکی ایجاد و یك لوله یا نیم لوله بر روی آن قرار می‌گرفت. دهانه این نیم لوله به سمت پایین قرار داشت. بعد از آن بر روی این نیم لوله شن نرم ریخته و کانال به‌وسیله خاك پر می‌شد تا نیروی موییننگی لایه شن نرم، آب را به سمت بالا انتقال دهد. هدف این بود که دانه‌بندی و قطر لایه شن مورداستفاده میزان انتقال آب به بالا را تعیین نماید (Dorter، ۱۹۶۱).

ارزیابی: به نظر می‌رسد که این روش علاوه بر پرهزینه بودن در عمل چندان کارآمد نباشد؛ زیرا جریان آب حداکثر پس از چند بار آبیاری، جداره شیار داخل لایه گل را شسته و سبب نشست نیم لوله سفالی می‌شود.

Wagner (۱۹۳۸) برای کاهش هزینه بالای سامانه آبیاری زیرسطحی، آزمایش‌هایی با دستگاهی به نام "شخم لوله[۸]"، انجام داد. شخم لوله که توسط Janert (۱۹۳۷a) ابداع شده بود از نظر اصول کاری همانند یک شخم لانه موشی بوده که یك خط لوله سیمانی متخلخل را در دل خاك فرم داده و سبب صرفه‌جویی ۸۰ تا ۹۰ درصدی هزینه می‌شد (شکل ۲).



شکل ۲- تصویر شخم لوله (سمت راست) و لوله سیمانی کارگذاری شده (سمت چپ) (Janert، ۱۹۳۷a)

ارزیابی: بررسی منابع نشان می‌دهد که این روش بعدها دیگر در مزارع آزمایشی موردتحقیق قرار نگرفت. زیرا مسائل متفاوتی چون انقباض و انبساط خاک در نتیجه تغییرات درجه حرارت و یا رطوبت، فشار ناشی از بار مکانیکی ادوات کشاورزی، حرکت خاك در نتیجه نشست طبیعی زمین در طول سال‌های پس از نصب سیستم، زلزله و فشار ناشی از رشد ریشه‌های قطور در زیر و روی لوله‌ها برای یك خط لوله یک‌تکه زیرسطحی از جنس بتن، مخاطرات بسیار ایجاد می‌کند.

Janert (۱۹۳۷b و ۱۹۵۵) بر روی جنس‌های مختلف لوله زیرسطحی تحقیق نموده و لوله‌های مختلفی از جمله لوله‌های معمولی و سوراخ‌دار زهکشی از جنس سفال با اتصالات آب‌بندی‌شده، لوله‌های سیمانی با موادی چون شن درشت، شاموت، سربار کوره بلند، خاک‌اره و یا لوله‌های مستحکم‌تر از جنس سیمان کوره و سیمان رسی کوره با مخلوط شن را مورداستفاده قرار داده بود سرانجام پس از ابداع شخم لوله (شکل ۲)، ماشین "شخم گرایفس والد" را ابداع نمود. این ماشین ورقی از جنس وینیدو (نوعی پلاستیك) را به‌صورت لوله در زیر زمین کارگذاری می‌کرد.

ارزیابی: لوله‌های وینیدو در پروژه‌های تحقیقاتی مانند استفاده از آب فاضلاب در آبیاری و یا نفوذ دادن فاضلاب به خاک توسط سیستم زهکشی نیز مورداستفاده قرار می‌گرفتند. این لوله‌ها مشکل شکستگی لوله‌های یک‌تکه از جنس بتن را ندارند؛ اما به لحاظ هیدرولیکی به دلیل نوع منافذ خروج آب، دارای دو مشکل اساسی می‌باشند که یکی افت شدید فشار و دیگری تلفات زیاد آب است.

کارگذاری ماشینی لوله‌های سوراخ‌دار پی‌وی‌سی برای زهکشی که بعدها انجام شد و سپس نصب ماشینی لوله‌های قطره‌ای زیرسطحی در زیر سطح خاک را می‌توان ادامه کار Janert با شخم گرایس والد دانست.

Stauch (۱۹۴۸، ۱۹۵۰، ۱۹۵۲، ۱۹۵۴) لوله‌هایی از جنس مخلوط سیمان و سنگ‌ریزه، با تراوایی موضعی ابداع نمود. قطر داخلی و خارجی این لوله‌ها به ترتیب ۳۵ تا ۴۰ و ۶۵ تا ۹۰ میلی‌متر و طول آن‌ها ۵۰ تا ۸۰ سانتی‌متر بود. این لوله‌ها با فاصله ۶۰ تا ۶۰۰ سانتی‌متر در خاك کارگذاری شده و علاوه بر آبیاری، به‌وسیله آن کوددهی با کودهای محلول در آب نیز، انجام می‌گرفت. نتایج تحقیقات Schendel و Tamm (۱۹۵۴) بر روی سامانه ابداع‌شده توسط اشتاوخ نشان داد که این سامانه به شیب زمین حساسیت زیادی دارد، به‌طوری‌که در مناطقی که طول لوله زیاد می‌شود، حتی شیب کم زمین (۰/۸۳ درصد) مانع از آبدهی یکنواخت لوله‌ها می‌گردید.

Stein (۱۹۵۲a و ۱۹۵۳) بر این نکته تأکید کرد که تاکنون مواد اولیه مورداستفاده، مانع بزرگی برای گسترش روش آبیاری زیرسطحی بوده است. وی در این رابطه بیان داشت که "یکی از اشکالات لوله‌های سفالی تراوا، تخلخل اندک آن‌ها بوده و از سوی دیگر در صورت تعبیه سوراخ در جداره‌ی لوله‌ها، نفوذ ریشه سریعاً آن‌ها را مسدود می‌کند. در حالتی که آبدهی از حدفاصل بین دو لوله انجام شود نیز، توزیع آب بسیار غیریکنواخت بوده و چنانچه لوله‌ها به یکدیگر متصل گردند، همان‌گونه که یانرت[۹] تشخیص داده بود، آب‌بندی اتصالات لوله‌های سفالی پرهزینه و دشوار می‌شود. لوله‌های تولیدشده از ورق آهن نیز علاوه بر هزینه زیاد، عمر مفید کوتاهی داشته و لوله‌های سیمانی متخلخل اگرچه راحت‌تر تولید می‌شوند، اما مورد هجوم اسیدهای خاك قرارگرفته و عمر مفید آن‌ها کم می‌شود". وی نیز در سال ۱۹۵۰

لوله‌هایی به‌صورت تمام متخلخل و نیمه متخلخل از جنس مخلوطی از بیتومین[10] داغ (قیر طبیعی)، شن درشت و سنگریزه با قطر ۰/۵ تا ۵ میلی‌متر ابداع نمود. در لوله‌های تمام متخلخل، لوله با فشار کم آب پر می‌شد، درحالی‌که در لوله‌های نیمه‌متخلخل که فقط قسمت فوقانی لوله دارای تخلخل بود، آب در کف لوله بدون این‌که لوله کاملاً پر شود، جریان می‌یافت. نتایج تحقیقات انجام‌شده بر روی این لوله‌ها توسط Dorter (۱۹۶۲) نشان داد که ریشه گیاهان به درون لوله‌های بیتومین نفوذ کرده است (شکل ۳).

شکل ۳- لوله‌های نیمه متخلخل طبق روش اشتاین (Dorter، ۱۹۶۱)

از سال ۱۹۶۰ که تولید لوله‌های پلاستیکی به صورت انبوه انجام و توجیه اقتصادی پیدا کرد، تحقیقات آبیاری زیرسطحی با این لوله‌ها رونق بیشتری یافت (Davis، ۱۹۶۷).

در سال ۱۹۶۴ Niederwemmer دستگاه مخصوصی به نام آریدو کولتیواتور[11] ساخت، که یك لوله قابل ارتجاع پلاستیکی را به همراه یک‌لایه نایلون در خاك کارگذاری می‌نمود. این روش زیرسطحی توسط Youssefie (۱۹۶۷) و Erdin (۱۹۷۲) موردبررسی قرار گرفت. آن‌ها برای این کار از لوله‌های پی‌وی‌سی سوراخ‌دار مخصوص زهکشی با قطر داخلی ۴۰ تا ۵۰ میلی‌متر استفاده کردند. برای جلوگیری از حرکت آب به‌طرف پایین از یك لایه نایلون با عرض ۲ متر در زیر لوله استفاده شد. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که اگرچه در این روش از اتلاف آب به سمت عمق جلوگیری می‌شود، اما خطر شور شدن خاك زیاد است؛ زیرا لایه نایلونی، اجازه زهکشی و شستن نمک‌ها به عمق خاك را در هنگام آبشویی یا بارش باران‌های زمستانی نمی‌دهد. در هر دو آزمایش، به ورود گل‌ولای به لوله‌ها و نفوذ ریشه‌ها به درون منافذ آن‌ها اشاره شده است که با توجه به بزرگ بودن منافذ لوله‌های زهکشی طبیعی به نظر می‌رسد. Mertin (۱۹۷۴) و Penningsfeld و Dequin (۱۹۶۸) گزارش کردند که نفوذ ریشه حتی در لوله‌های دارای یك لایه پوششی فیلتر نیز مشاهده گردید.

Davis (۱۹۶۷) در تحقیقات خود از ترکیب لوله‌های سفالی تراوا و پی‌وی‌سی استفاده کرد که در هر متر طول آن از ۶۶ سانتی‌متر لوله پی‌وی‌سی نرم و ۳۳ سانتی‌متر لوله سفالی تراوا استفاده می‌شد. قطر داخلی، خارجی و طول لوله‌های سفالی مورداستفاده به ترتیب ۱۲/۵، ۲۵ و ۳۳۰ میلی‌متر بود. این لوله‌ها با فشار ۱۲۰ تا ۱۵۰ هکتو پاسکال عمل می‌کردند. این سیستم در کشت علف‌های مرتعی در فلوریدا و همچنین در تعدادی از مؤسسات تحقیقات آمریکایی[12] مورد آزمایش قرار گرفت. گزارش Davis (۱۹۶۷) نشان می‌دهد که در زمان آبیاری درختان جوان مرکبات در طول فصل رشد، آبدهی این سیستم به حدی کاهش پیدا کرد که مکش آب خاك به بیش از یک‌بار رسید، به‌طوری‌که تأمین آب موردنیاز درختان با مشکل مواجه شد. همچنین در سایر سامانه‌های تحت آزمایش، استفاده از لوله‌های پلاستیکی نسبت به سفالی باصرفه‌تر بود.

ارزیابی: در مورد تجربه فوق به نظر می‌رسد که نحوه طراحی خطوط لاترال در این روش و استفاده از میزان بالای لوله پی‌وی‌سی، (دوسوم از جنس پی‌وی‌سی و یک‌سوم از جنس سفال) سبب کاهش آبدهی لوله‌های سفالی و نقطه‌ای شدن آبدهی سیستم شده است. همچنین تراوایی اندک لوله‌های سفالی سبب کاهش سریع آبدهی در طول یک فصل رشد و بروز تنش رطوبتی گردیده است.

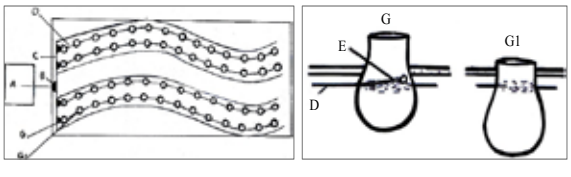
Stander (۱۹۷۱) روش دیگری از آبیاری زیرسطحی را با لوله‌های پلاستیکی ابداع کرد. لوله‌های مورداستفاده در این روش دارای منافذ ریزی برای خروج آب بوده که در حالت عادی بسته بوده و با افزایش فشار سیستم از یك حد مشخص باز می‌شدند. آبیاری زیرسطحی طبق روش Stander توسط انسیتوی امور آب و اکولوژی دانشگاه کیل آلمان مورد ارزیابی قرار گرفت. در این بررسی‌ها روش‌های آبیاری بارانی متحرك و ثابت، زیرسطحی طبق روش نیدرومرو و طبق روش اشتندر از نظر هزینه‌های سالیانه و نصب موردبررسی قرار گرفتند. نتیجه این بررسی‌ها نشان داد، آبیاری زیرسطحی طبق روش اشتندر از هر دو جنبه بسیار پرهزینه‌تر از سایر روش‌ها می‌باشد (Baumman و Mann، ۱۹۷۴).

در تحقیقات دیگری تحت عنوان مقایسه روش‌های آبیاری که از سوی سازمان همکاری‌های فنی آلمان در منطقه ساحل نیجریه انجام شد، آبیاری زیرسطحی طبق روش Stander با ۳ روش آبیاری سطحی (کرتی، نواری و شیاری) و روش‌های آبیاری بارانی و قطره‌ای مقایسه گردید (Zabel، ۱۹۸۳). نتیجه این آزمایش نشان داد، در روش اشتندر برخی از منافذ خروجی لوله‌های آبده، در فشار معمولی باز نمی‌شوند و با افزایش فشار، آبدهی برخی دیگر از این منافذ یکنواخت نبود. علاوه بر پاره شدن برخی از لوله‌ها، در بعضی از خطوط لوله سالم، تلفات عمقی آب به حدی بود که مصرف آب در مقابل روش‌های آبیاری بارانی به ۷ برابر رسید. همچنین از آنجایی‌که جوانه‌زنی و رشد گیاه در قطعات آبیاری زیرسطحی یکدست نبود، نیاز به یک‌بار آبیاری سطحی در ابتدای کشت الزامی گردید.

در همین زمان در برخی دیگر از تحقیقات، از ظروف سفالی برای آبیاری استفاده می‌شد. مبنای این ایده‌ها همان آبیاری کوزه‌ای بوده که در ایران و شمال آفریقا سابقه‌ای طولانی دارد (مهدی‌زاده، ۱۳۵۴؛ Stein، ۱۹۹۴). اینکه کوزه از چه زمانی برای آبیاری گیاهان در کشاورزی مورداستفاده قرار گرفته، مشخص نیست؛ اگرچه بر مبنای شواهد تاریخی شروع استفاده از آن در ایران از چند هزار سال پیش ممکن بوده است. آزمایش‌های انجام‌شده توسط مهدی‌زاده (۱۳۵۴) با کوزه‌های ۱۰ لیتری در کشت درختان مختلف و یا تحقیقات

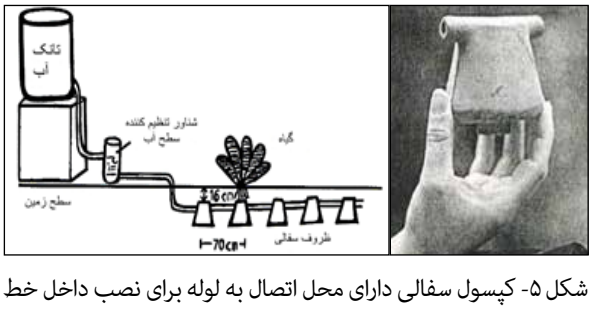
انجام‌شده توسط جواهری (۱۳۵۵) با کوزه‌های کوچك‌تر ۱۵۰ و ۲۵۰ میلی‌لیتر در کشت هندوانه با آب شور، نتایج موفقیت‌آمیزی را در استفاده از کوزه برای آبیاری نشان می‌دهند. طبق تحقیقات انجام‌شده آبیاری کوزه‌ای بالاترین بازدهی را در میان کلیه روش‌های آبیاری موجود داشته است (National academy of sciences، ۱۹۷۴). این روش آبیاری تا دهه ۷۰ میلادی به صورت موردی در حاشیه کویر لوت مورداستفاده قرار می‌گرفت (Alemi، ۱۹۸۱). اگرچه از حدود ۶۰ الی ۷۰ سال پیش استفاده از کوزه در ایران به دلیل مکانیزه شدن کشاورزی متروکه شد، اما در دیگر کشورهای دنیا با تغییراتی در نوع سامانه آبیاری، موردبررسی محققین بوده است. Stein (۲۰۱۳) فهرست مفصلی از تحقیقات انجام‌شده در رابطه با سامانه‌های مختلف سفالی ارائه نموده است.

Silva (۱۹۸۸) با استفاده از لوله‌های پلاستیکی، کوزه‌ها را به یکدیگر متصل کرده و یک سیستم کاملاً خودکار را در برزیل ابداع نمود (شکل ۴). در این سامانه، آبیاری به‌صورت نقطه‌ای و با فشار کم صورت می‌گرفته و امکان کوددهی با کودهای محلول در آب نیز وجود داشت. هزینه سیستم بسته به تراکم کارگذاری کوزه‌ها و میزان لوله موردنیاز متفاوت می‌باشد. طبق نظر Barth (۱۹۸۸) هزینه این سامانه در یك الگوی کارگذاری ۲×۲ متر، چند برابر خواهد شد که نشان می‌دهد تراکم بالا تا چه حد هزینه این سیستم را افزایش می‌دهد.



شکل ۴- یك روش خودکار برای آبیاری در قطعات کوچك‌تر طبق روش سیلوا. A: تانك تغذیه، B: شیر آب، C: لوله انتقال آب اصلی، E: شناور، G: ظرف تغذیه (سفال غیرتراوا)، G1: ظرف آبیاری، D: لوله انتقال آب دو کوزه (Silva، ۱۹۸۸)

Schick (۱۹۹۰) از ساخته‌شدن کپسول‌هایی گزارش می‌کند که دارای ورودی و خروجی مجزا برای آب می‌باشند (شکل ۵).



شکل ۵- کپسول سفالی دارای محل اتصال به لوله برای نصب داخل خط با امکان خروج هوا از سیستم (سمت راست) و نحوه کارگذاری آن در سیستم آبیاری (سمت چپ) (Schick، ۱۹۹۰)

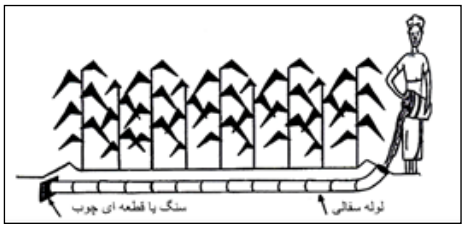
Yabe و Tanigana (۱۹۹۱) آزمایشی با کپسول‌های سفالی تراوا با طول و قطر خارجی به ترتیب ۲۲ و ۵ سانتی‌متر انجام دادند. آبدهی این سیستم نیز نقطه‌ای بود و قطعات کپسول تراوا، عملاً نقش قطره‌چکان‌های سیستم آبیاری قطره‌ای را ایفا می‌کرد، با این تفاوت که کپسول‌ها در زیر سطح خاك کارگذاری می‌شدند. این سیستم با فشار اندک راه‌اندازی شده و پس از پر شدن کپسول‌ها سطح آب پایین‌تر از کپسول‌ها نگه داشته می‌شد تا با فشار منفی عمل نماید. نمونه دیگری از این روش توسط David (۱۹۹۱) در کالیفرنیا، مورداستفاده قرار گرفت.

ارزیابی: استفاده از کپسول‌های سفالی موانعی را نیز به همراه داشت که کاربرد این سیستم‌ها را بیشتر محدود به شرایط خاص و قطعات کوچک چون باغچه‌ها می‌کرد. بسته بودن کپسول‌های سفالی موجب حبس هوا در داخل آن‌ها شده که یکنواختی آبیاری را با مشکل مواجه می‌سازد. از سوی دیگر برای آبیاری درختان بزرگ بارده با این روش، بایستی تعداد زیادی کپسول به تعداد قطره‌چکان‌های آبیاری قطره‌ای (۶ تا ۸ کپسول) در منطقه ریشه کار گذاشته شود که هزینه‌های سامانه را برای کندن چاله‌ها و نصب قطعات افزایش می‌دهد. در صورت نصب کپسول‌ها در عمق کم، تلفات تبخیر اجتناب‌ناپذیر و انجام عملیات مکانیزه پرمخاطره خواهد بود. نصب کپسول‌ها در عمق، عملیات نصب را پرهزینه و تعمیرات را دشوار می‌کند.

Lovell و همکاران (۱۹۹۰) و Batchelor و همکاران (۱۹۹۶)، در انگلیس گزارشی از یک روش آبیاری زیرسطحی با لوله سفالی را ارائه نموده‌اند. لوله‌های سفالی مورداستفاده در این تحقیق بسیار ابتدایی بود؛ به‌گونه‌ای که برای پخت به روش محلی در گودال‌هایی داخل خاک قرار گرفته و با حرارت هیزم پخته می‌شدند. قطر داخلی و خارجی این لوله‌ها به ترتیب ۷/۵ و ۱۱/۵ سانتی‌متر بوده که با سیمان به یکدیگر نصب می‌شدند (شکل ۶).

Stein (۱۹۹۷) در این مورد می‌نویسد: «اگرچه این لوله‌ها تا حدودی تراوا بودند، ولی تقریباً تمام آب آبیاری از حدفاصل بین لوله‌ها به بیرون جاری می‌شد. لذا در این روش خاصیت تنظیم خودکار رطوبت خاك (همچون آبیاری کوزه‌ای) وجود ندارد».

ارزیابی: هدف محققین در این روش ارائه راهکاری بوده که تولید لوله‌ها توسط کشاورزان را امکان‌پذیر سازد. این در حالی است که غیریکنواخت شدن ضخامت جداره و میزان آبدهی و مقاومت مکانیکی لوله‌ها؛ انسداد لوله‌ها به دلیل ورود ذرات لای، رس، شن، باکتری و جلبک‌ها خروج آب از اتصال بین دو لوله و اتلاف آن به سمت عمق، خیس شدن سطح خاک، افزایش تلفات تبخیر، رشد علف هرز و شور شدن خاک؛ استفاده از اتصالات سیمانی انعطاف‌ناپذیر همراه با عمق کارگذاری کم و آسیب‌پذیری سیستم در مقابل فشارهای مکانیکی؛ لزوم پر کردن دستی لوله‌ها و افزایش نیروی کارگری از دیگر مشکلات این سامانه ابداعی هستند.



شکل ۶- آبیاری زیرسطحی (Batchelor و همکاران، ۱۹۹۶)

Lomax (۱۹۸۸)، آزمایش‌هایی را روی آبدهی لوله‌های متخلخل "تراوای لاستیکی" با نام تجاری ایریگرو[۱۳] انجام داد. با بالا رفتن فشار، جریان آب در این لوله‌ها افزایش‌یافته درحالی‌که با گذشت ۱۰ روز از کارگزاری سامانه، یک افت فشار تدریجی در لوله‌ها مشاهده گردید که قابل توجیه نبوده و از آن تحت عنوان اثر دکلین[۱۴] یاد می‌شود.

در سال ۱۹۹۰ Hettinga لوله‌های تراوا لاستیکی ابداع نمود که با استفاده از دو نوع صمغ ناسازگار با یکدیگر تولید می‌شدند. این صمغ‌ها به وسیله یك اکسترودر[۱۵]، به‌صورت لوله پرس شده و میزان تراوایی آن با "دمیدن گاز یا هوای داغ" به داخل لوله تعیین می‌گشت.

Smajstrla (۱۹۹۲) در مورد آزمایش‌های درازمدت خود با ۳ نوع از این لوله‌های لاستیکی تراوا گزارش داد که در طول ۲ سال اول، تراوایی آن‌ها به‌طور خطی افت کرد، اما با افزایش فشار سیستم، آبدهی لوله‌ها تا حد اولیه افزایش یافت.

Mahbub-ul-Alam (۱۹۹۱) از تجربیات خود با لوله‌های تراوای لاستیکی با قطر داخلی ۱۶ میلی‌متر و فشار کارکرد ۰/۲ تا ۰/۴ بار، برای آبیاری درختان سیب و یك مزرعه هندوانه گزارش داد. نتایج این تحقیقات نشان داد که در ابتدای خط لوله، آب زیادی تلف‌شده و در انتهای آن افت فشار شدیدی وجود داشت؛ لذا وی توصیه نمود که برای کاهش این مشکل، طول خط لوله‌ها کوتاه‌تر انتخاب گردد.

در سال ۱۹۹۱ در مدرسه عالی انسام[۱۶] (شهر مون پلیه فرانسه) آزمایش دیگری با این نوع لوله انجام شد. نتایج نشان داد که در ابتدای خط لوله‌ها، بخصوص در مراحل اولیه رشد (جوانه‌زنی و رشد اولیه)، اتلاف آب ناشی از حرکت ثقلی اجتناب‌ناپذیر است (Aquaspa، ۱۹۹۴). کاهش فشار، از اتلاف ثقلی آب جلوگیری کرد؛ اما آبدهی لوله‌ها به زمین بخصوص در انتهای خط با مشکل مواجه شد. این لوله‌ها در دیزنی لند پاریس نیز برای آبیاری فضای سبز مورد استفاده قرار گرفت (Aquaspa، ۱۹۹۴). Edlin (۱۹۷۰)، Mitchell و همکاران (۱۹۷۴)، Lomax (۱۹۸۸) و Mahbub-ul-Alam (۱۹۹۱) در گزارش خود اشاره می‌کنند که «این لوله‌های تراوای لاستیکی قبل از انجام تحقیقات کافی و رفع نقاط ضعف آن‌ها، به بازار عرضه شده‌اند».

در ادامه تحقیقات انجام‌شده با لوله‌های پلاستیکی، Yoder و همکاران (۱۹۹۵) آزمایش‌هایی با لوله‌های تراوای (متخلخل) لاستیکی از جنس لاستیك بازیافت شده اتومبیل و پلی‌اتیلن انجام دادند. در گزارش ارائه‌شده توسط آن‌ها عنوان شده است که فناوری یا نحوه تولید این محصول اجازه اعمال کنترل لازم بر روی قطر منافذ و توزیع آن‌ها در جداره متخلخل لوله‌ها را نمی‌دهد. آبدهی لوله‌ها در فشار کارکرد صفر تا ۲۰۷ کیلو پاسکال به‌صورت خطی افزایش پیدا کرد. در حین آزمایش مشخص شد، فشار بالای ۱۳۸ کیلو پاسکال، شکل فیزیکی لوله را تغییر می‌دهد؛ همچنین در امتداد طول لوله، تغییرات شدیدی در آبدهی مشاهده گردید؛ که با مشخصات داده‌شده از سوی شرکت تولیدکننده همخوانی نداشت. این موضوع نشان‌دهنده دشواری‌های تولید لوله‌های لاستیکی تراوا با تخلخل و آبدهی یکنواخت است که بایستی از طریق دمیدن هوای داغ به داخل لوله در حین تولید آن ایجاد گردد.

Teeluck و Sutton (۱۹۹۸) در آزمایشی دیگر ضریب یکنواختی آبدهی در این لوله‌ها را در ۱۱ نمونه ۶ متری اندازه‌گیری نمودند. نتایج آبدهی لوله‌ها در مقاطع ۱۰ سانتی‌متری نشان داد که ضریب یکنواختی نمونه‌ها بین ۲۴ تا ۴۹ درصد بوده که در رنج استاندارد ۲۰ تا ۳۵ درصد قرار نمی‌گرفت. کوتاه بودن عمر مفید این لوله‌ها به دلیل پوسیدن در خاک و مسائل زیست‌محیطی همچون وجود کادمیم در لاستیك تایر اتومبیل‌ها از دیگر مشکلات لوله‌های تراوای لاستیکی می‌باشند. البته ابداع‌کننده این لوله‌ها نیز به محدودیت‌های این روش واقف بوده، لذا استفاده از آن را برای آبیاری اراضی ورزشی توصیه نموده و نه در کشاورزی (Turner، ۱۹۷۵).

دو موضوع تحقیقاتی دیگر که در رابطه با انواع لوله‌های مورداستفاده در روش زیرسطحی توسط محققین موردبررسی قرار گرفته است، معضل گرفتگی منافذ در طول زمان و افت فشار است. اگرچه مشکل افت فشار در طول لوله با کاهش قطر منافذ تا حدودی قابل حل است، اما منجر به گرفتگی سریع منافذ خواهد شد. در ابتدای استفاده از روش قطره‌ای هنوز از لوله‌های منفذدار استفاده می‌شد. اما با گذشت زمان این مشکل با ابداع و کاربرد قطره‌چکان‌ها حل گردید. قطره‌چکان‌ها با ایجاد مقاومت در مسیر خروج آب مانع افت فشار در شبکه شده به‌گونه‌ای که فشار نسبتاً ثابتی در سرتاسر شبکه ایجاد می‌شود. پس از این ابداع، دیگر لوله‌های روزنه‌دار مورداستفاده قرار نگرفتند (Cole، ۱۹۷۱).

از حدود دهه ۱۹۶۰ به بعد در بسیاری از تحقیقات از روش قطره‌ای زیرسطحی استفاده شده است. در این حالت همان روش قطره‌ای سطحی با استفاده از قطره‌چکان‌های کارگذاری شده در داخل لوله به‌صورت زیرسطحی کارگذاری می‌شود. کاربرد روش قطره‌ای به‌صورت زیرسطحی برای رفع بسیاری از مشکلات روش قطره‌ای چون تلفات آب به‌واسطه تبخیر، شوری سطح خاک، رشد علف‌های هرز و عدم امکان تردد ماشین‌آلات کشاورزی، از ابتدا مدنظر محققین بوده است. Lamm و همکاران (۲۰۰۹ و ۲۰۱۲) گزارشی از وضعیت فعلی روش آبیاری زیرسطحی در آمریکا ارائه کرده‌اند. به‌طورکلی در مسیر گسترش این روش هنوز مسائلی وجود دارند که سبب شده با وجود گذشت بیش از نیم‌قرن از شروع استفاده از آن سطح تحت آبیاری با آن در آمریکا که بیشترین رشد را داشته

است، در حد یک درصد کل اراضی تحت آبیاری و حدود دو درصد اراضی آبیاری تحت‌فشار در آن کشور باشد (Goyal، ۲۰۱۴؛ Lamm و همکاران، ۲۰۱۲). در عمل مهم‌ترین مشکلات روش زیرسطحی قطره‌ای به دودسته نحوه آبدهی قطره‌چکان‌ها به خاك و نفوذ ریشه به درون قطره‌چکان‌ها قابل تقسیم‌بندی می‌باشد که به دلیل اهمیت آن‌ها در زیر موردبحث قرار می‌گیرند:

۱- نحوه آبدهی قطره‌چکان‌ها به خاک

در سامانه قطره‌ای زیرسطحی، نحوه آبدهی قطره‌چکان‌ها، سبب اشباع سریع خاک و حرکت آب به سمت عمق و یا سطح خاک می‌شود (Keller و Bliesner، ۱۹۹۰).

خیس‌شدن سریع سطح خاك مزیت عمده آبیاری زیرسطحی را تا حدی زیادی از بین می‌برد؛ زیرا تبخیر از سطح خاک به معنی تلف‌شدن آب است که جلوگیری از آن هدف اصلی در آبیاری زیرسطحی می‌باشد. از سوی دیگر تبخیر آب موجب تجمع نمک در سطح خاک می‌شود. نمک‌های تجمع یافته در سطح زمین در فصل زمستان به همراه بارندگی و یا بارش برف، شسته و به منطقه ریشه وارد و سبب بروز خسارت به درختان می‌گردند (صالحی، ۱۳۸۴). از مسائل دیگر خیس‌شدن سطح خاک، ایجاد شرایط مناسب برای رشد علف‌های هرز سطحی است.

مشکل دیگر در روش آبیاری قطره‌ای اعم از سطحی یا زیرسطحی، آبدهی نقطه‌ای[17] آن است. این امر مانع استفاده گیاه از تمام ظرفیت سامانه ریشه می‌شود. محدود شدن برداشت آب و غذا و تهویه ریشه به یک منطقه نسبتاً کوچک در اطراف قطره‌چکان‌ها، عملکرد محصول را کاهش می‌دهد (Keller و Karmel، ۱۹۷۴). Bastani (۱۹۹۸) گزارشی از تحقیقات انجام‌شده با روش‌های آبیاری قطره‌ای و شیاری در کشت گیاه ذرت در کرج ارائه کرده است. نتایج این تحقیقات نشان داد که در روش آبیاری قطره‌ای با وجود استفاده از دو قطره‌چکان در هر متر طول لوله، عملکرد محصول ذرت دانه‌ای به ۷ تن در هکتار کاهش یافت، درحالی‌که عملکرد محصول در روش شیاری در شرایط مشابه ۱۰ تن در هکتار بود. لذا برای رفع این محدودیت بایستی تعداد قطره‌چکان‌ها در هر متر طول افزایش یابد. این موضوع به‌ویژه در صورت استفاده از قطره‌چکان‌های گران‌قیمت مقاوم در مقابل نفوذ ریشه، هزینه سامانه را افزایش می‌دهد.

۲- نفوذ ریشه به درون قطره‌چکان‌ها

مسئله نفوذ ریشه به داخل قطره‌چکان‌ها از دیگر موانع همیشگی استفاده از روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی است (Lamm و همکاران، ۲۰۱۲ و Zoldske، ۱۹۹۹). در سال‌های اخیر استفاده از سم علف‌کش تری‌فلورالین[18] با نام تجاری ترفلان[19] برای مقابله با رشد ریشه متداول شده است. ترفلان مانع رشد و تکثیر سلول‌های مریستمی ریشه می‌گردد (Suarez-Rey و همکاران، ۲۰۰۶) و عمدتاً به سه روش مورداستفاده قرار می‌گیرد: افزودن آن به آب آبیاری جهت تزریق به خاك اطراف قطره‌چکان‌ها؛ استفاده از قطره‌چکان‌های مقاوم به رشد ریشه که به ترفلان آغشته شده‌اند و استفاده از فیلترهای دیسکی با صفحات آغشته به سم. استفاده از ترفلان به علت سرطان‌زا بودن آن در بسیاری از کشورها از جمله جامعه مشترک اروپا ممنوع گردیده است (Stokstad، ۲۰۱۶).

ارزیابی: استفاده از سم علف‌کش برای مقابله با نفوذ ریشه نیز با مشکلاتی همراه است. به‌طور مثال مسائلی چون خطای کارگری یا کم‌اطلاعی و سهل‌انگاری در تزریق صحیح سم علف‌کش به آب آبیاری و یا قطع نکردن به‌موقع جریان تزریقی به یك قطعه، می‌تواند موجب آلودگی خاک، محیط ریشه گیاه و احیاناً بلااستفاده شدن زمین تا مدتی شود.

در روش دوم، علف‌کش در هنگام آبیاری به‌تدریج از جداره داخلی قطره‌چکان مقاوم به رشد ریشه آزاد شده مانع رشد ریشه به داخل قطره‌چکان می‌گردد. Yu و همکاران (۲۰۱۰) و Suarez-Rey و همکاران (۲۰۰۶) در زمینه اثر ترفلان روی رشد و نفوذ ریشه به داخل قطره‌چکان‌ها تحقیقاتی انجام داده‌اند اما در زمینه میزان دوام و اثرگذاری سم تزریق‌شده به داخل قطره‌چکان‌ها در درازمدت تحقیقی در دست نمی‌باشد.

ارزیابی: قرارگیری قطره‌چکان‌ها در مراحل مختلف حمل‌ونقل در معرض تابش اشعه خورشید یا هوای گرم، تصاعد ترفلان را اجتناب‌ناپذیر می‌نماید. همچنین عبور جریان آب از داخل مجاری قطره‌چکان‌ها موجب شسته شدن و کاهش تدریجی غلظت سم می‌گردد. در نتیجه ممکن است ریشه‌ها پس از مدتی به درون منافذ قطره‌چکان‌ها رشد کرده و سبب گرفتگی آن‌ها گردند.

یک روش دیگر که با هدف رفع نقاط ضعف اساسی آبیاری قطره‌ای زیرسطحی ابداع و به بازار ارائه شده، روش آبیاری زیرسطحی کاپیلاری یا به اختصار کیس (KISSS)[20] نام دارد. در این روش که همان روش آبیاری قطره‌ای است، از یک غلاف پارچه‌ای از جنس پلی‌استر برای لوله استفاده می‌شود. وظیفه این غلاف جلوگیری از نفوذ ریشه و توزیع بهتر رطوبت در خاک و نزدیک کردن آبدهی سیستم از حالت نقطه‌ای به خطی است. در رابطه با ریشه اگرچه نفوذ به داخل پلی‌استر ممکن است (CSIRO Land and Water، ۱۹۹۸)، اما مسدود شدن قطره‌چکان تاکنون گزارش نشده است. در رابطه با توزیع رطوبت نیز، لوله‌های کیس به دو شکل تولید می‌شوند، در یک نوع از آن نوار تیپ داخل غلاف پلی‌استر کارگذاری می‌شود. این نوع لوله که فلت[21] نام دارد، برای کارگذاری در عمق کم خاک طراحی شده تا سطح را بصورت یکدست خیس نماید. کاربرد این نوع لوله مناسب آبیاری زمین‌های چمن و ورزشی می‌باشد (kisssamerica.com/Products/KISSS-Flat، ۲۰۱۸). شدت خیس و اشباع شدن سطح زمین در تحقیق Abass و همکاران (۲۰۱۵) با لوله‌های آبیاری کیس با عمق کارگذاری ۱۵ و ۲۵ سانتی‌متر در یک خاک شنی، بیان شده است. نتایج این تحقیق نشان داد که میزان رطوبت در بالای لوله، ۵۰ درصد حجمی

یعنی ۴ برابر ظرفیت نگهداری خاک (ظرفیت مزرعه) بوده است. در کشاورزی مکانیزه بایستی عمق کارگذاری بگونه‌ای در نظر گرفته شود که امکان شخم عمیق وجود داشته باشد. لذا شرکت تولید کننده نوع دیگری از لوله کیس را برای کاربرد در کشاورزی طراحی نموده که راپ[۲۲] نام دارد. در این نوع بجای نوار تیپ از لوله ۱۶ میلی‌متری آبیاری قطره‌ای استفاده شده تا امکان تحمل فشار ناشی از وزن خاک در عمق‌های پایین‌تر وجود داشته باشد (kisssamerica.com/Products/KISSS-Wrap، ۲۰۱۸).

ارزیابی: در سیستم کیس نحوه آبدهی به خاک برخلاف ادعای شرکت تولیدکننده کاپیلار[۲۳] یا نشتی نیست، زیرا در آبیاری نشتی آبدهی به خاک به صورت تدریجی و دایمی صورت می‌گیرد و رطوبت خاک نباید از حد ظرفیت زراعی بیشتر شود. اما در روش کیس آبیاری همانند آبیاری قطره‌ای بصورت دوره‌ای انجام شده که جلوگیری از حرکت ثقلی آب به سمت عمق و یا خیس شدن سطح خاک را دشوار می‌نماید. از سوی دیگر قیمت فروش این لوله‌ها که تحت عنوان کاپیلار به فروش می‌رسند برای کشاورزی بسیار زیاد است. بطور مثال در سایت شرکت عرضه کننده قیمت فروش هر رول ۱۰۰ متری لوله راپ مخصوص کشاورزی ۳۱۸ دلار ذکر شده است (kissslawnandgarden.com/kisss-wrap-rolls، ۲۰۱۸).

• آبیاری زیرسطحی با لوله‌های سفالی

با توجه به مشکلات ذکرشده در رابطه با روش‌های گوناگون آبیاری زیرسطحی، ضرورت ابداع یک فناوری مناسب برای کمک به کاهش مشکل بحران آب در کشورهای مناطق خشک احساس می‌شد. در این راستا از سال ۱۹۸۷، Bastani به انجام تحقیقات برای ابداع یک سامانه آبیاری مناسب پرداخت. بررسی مشکلات مذکور در سایر تحقیقات نشان می‌داد که سامانه موردنیاز برای موفقیت عملی بایستی دارای خصوصیات زیر باشد:

الف) آبدهی سامانه بایستی نشتی باشد تا از حرکت سریع آب به سمت عمق که در شرایط اشباع اتفاق می‌افتد، جلوگیری و مانع خیس شدن سریع سطح خاک، در نتیجه تلفات تبخیر و تجمع نمک و رشد علف‌های هرز گردد.

ب) آبدهی لوله‌های فرعی (لاترال) به‌صورت خطی و در طول لوله انجام گیرد تا برداشت آب و غذا توسط ریشه‌ها از حجم بیشتری از خاک انجام و عملکرد محصولات کاهش نیابد.

ج) قطر منافذ جداره لوله‌ها بایستی زیر ۵۰ میکرون باشد تا ریشه گیاهان و یا علف‌های هرز امکان نفوذ به درون منافذ آبده و مسدود نمودن آن‌ها را نداشته باشند.

د) با توجه به اینکه ۸۷ درصد کشاورزان ایرانی دارای قطعات کوچک کمتر از ۱۰ هکتار می‌باشند (سرشماری کشاورزی، ۱۳۹۳) که سامانه‌های تحت‌فشار در آن‌ها اقتصادی نیست، سامانه موردنظر بایستی بدون نیاز به فشار زیاد و تجهیزات پرهزینه تولید فشار، عمل نماید تا علاوه بر اراضی بزرگ، در قطعات کوچک نیز توسط کشاورزان خرده‌مالک قابل استفاده باشد.

ساخت و تست لوله‌های سفالی با حدود ۳۰۰۰ فرمول متفاوت از خاک معادن ایران، همراه با افزودنی‌های متفاوت انجام شد به‌گونه‌ای که لوله‌های تولیدی از هر دو صفت مقاومت و آبگذری بالا برخوردار باشند (Bastani، ۱۹۸۹).

پس از ارزیابی مواد مختلف، در نهایت لوله‌های سفالی با طول حدود ۳۳ و قطر خارجی ۳ سانتی‌متر تولید می‌شوند و با استفاده از اتصالاتی از جنس مواد پلاستیکی به یکدیگر متصل می‌گردند تا یک خط لوله متخلخل و انعطاف‌پذیر را به وجود آوردند. این خط لوله می‌تواند به‌صورت یك شبکه زیرسطحی مطابق با نیاز محصولات (زراعی، باغی، بوته‌کاری و فضای سبز) با عمق و فاصله مناسب در خاک نصب شود (شکل ۷).

شکل ۷- لوله‌های سفالی کارگذاری شده در کف کانال حفرشده در یک باغ پسته (سمت چپ) و یک قطعه باغ تحت آبیاری با این روش (سمت راست)

در این روش آب آبیاری با فشار کم پمپ چاه به داخل شبکه جریان یافته و به تدریج به خاك نشت می‌کند. مکش خاك خشك نیز به بیرون آمدن آب از لوله‌های سفالی کمك نموده و هنگامی که خاک اطراف لوله‌ها مرطوب شود، مکش خاک و در نتیجه آبدهی لوله‌ها کاهش می‌یابد (Bastani، ۱۹۹۸).

ارزیابی: لوله‌های متخلخل سفالی بر خلاف لوله‌های تراوای لاستیکی (که از جنس لاستیك بازیافتی تایر اتومبیل تولید می‌گردند) عاری از عناصر سمی چون کادمیوم (Schachtschabel و همکاران، ۱۹۷۶) و غیره بوده و برای مقابله با نفوذ ریشه نیازی به تزریق سم ندارند، لذا سبب آلودگی خاک، غذا و محیط‌زیست نمی‌گردند. همچنین برخلاف روش کپسولی سفالی، این روش به‌طور کامل در زیر سطح زمین نصب می‌گردد که مانعی برای انجام شخم و عملیات مکانیزه در سطح خاک ایجاد نمی‌نماید. نتایج تجارب به دست آمده در تحقیقات صحرایی با این سامانه در مقالات آتی ارائه خواهد شد.

جمع‌بندی

هدف از آبیاری زیرسطحی، رساندن رطوبت کافی به منطقه ریشه گیاه بدون خیس شدن سطح خاک و تلفات عمقی است؛ به‌گونه‌ای که دستیابی به بالاترین میزان کارایی آب تحت شرایط صحرایی ممکن

گردد. به علت راهبردی بودن این موضوع برای تأمین غذای جمعیت رو به رشد کره زمین، محققین بسیاری در طول حداقل ۱۲۰ سال گذشته از جمله در کشورهای اروپایی، آمریکایی و اتحاد جماهیر شوری سابق برای ابداع یک روش مناسب آبیاری زیرسطحی تلاش نموده‌اند. در این راستا استفاده از لوله‌های معمولی و منفذدار زهکشی از جنس سفال، لوله‌های سیمانی با موادی چون شن و سیمان، بیتومین، کپسول‌های سرامیکی در ابعاد متفاوت و یا انواع لوله‌های پلاستیکی، لاستیکی متخلخل و یا قطره‌چکان‌دار مورداستفاده و تحقیق قرار گرفته است. به‌طورکلی هیدرولیک سامانه‌ها به لحاظ آبدهی به خاک به دو حالت نقطه‌ای و یا خطی و توزیع رطوبت در خاک نیز به دوحالت، حرکت آب در محیط اشباع (خیساندن خاک به روش قطره‌ای یا غیره) و یا در محیط غیراشباع به‌صورت نشت تدریجی و خودکار رطوبت از جداره سفال (که در ارتباط با مکش ماتریک خاک و فقط در سامانه‌های کم‌فشار اتفاق می‌افتد) قابل تقسیم می‌باشند. علی‌رغم گذشت چندین سال از زمان آغاز نوآوری‌ها و تحقیقات انجام‌شده در زمینه آبیاری زیرسطحی، به دلیل وجود مشکلات فنی مختلف چون تلفات ناشی از نفوذ عمقی، خیس شدن سطح خاک که تبخیر و شوری سطح خاک و رشد علف‌های هرز را به دنبال دارد و یا رشد ریشه به داخل قطره‌چکان‌ها، این روش گسترش چندانی نیافته است.

روند فزاینده بحران در زمینه‌های حیاتی آب و غذا و دستاوردهای چشمگیر بشریت در طول قرن گذشته در سایر زمینه‌های علمی و فنی نشان‌دهنده ضرورت تلاش مضاعف برای دستیابی به فناوری مناسب آبیاری زیرسطحی برای استفاده بهینه از آب می‌باشد. هدفی دشوار که دستیابی به آن بدون اطلاع از تجارب و تلاش‌های قبلی ممکن نخواهد بود و این نوشتار در راستای کمک به تحقق آن تهیه گردید.

پی‌نوشت

1- Underground-Irrigation
2- Subsurface-Irrigation
3-The application of water below the soil surface throughemitters, with discharge ratesgenerallyin the same rate as drip irrigation
4- Point source
5- Line source
6- Dresden
7- Wiesbaden
8- Pipe plough
9- Janert
10- Bitumen
11- Arido Kultivator
12- SWC,ARS,USRD
13- Irrigro
14- Decline Effect
15- Exthruder
16- Ensam
17- Point Source
18- Trifluralin
19- Treflan
20- Kapillary Irrigation Subsurface System
21- Flat
22- Warp
23- Kapillar

منابع

جواهری، پ. ۱۳۵۵. بررسی امکان استفاده از کوزه‌های سفالی در آبیاری. وزارت کشاورزی و منابع طبیعی، موسسه خاکشناسی و حاصل‌خیزی خاک، ۴۸۶.

زارعی، ق. و شهپری، س.ع. ۱۳۹۲. ویژگی‌های هیدرولیکی کپسول‌های سفالی سامانه آبیاری زیرسطحی در سه بافت خاک. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی، ۱۴(۴): ۷۲-۵۷.

سرشماری عمومی کشاورزی. ۱۳۹۳. درگاه ملی آمار. مرکز آمار ایران.

صالحی، ف. ۱۳۸۴. شناخت خاک و تغذیه درختان پسته. موسسه تحقیقات پسته کشور، رفسنجان.

مهدی‌زاده، پ. ۱۳۵۴. تحقیق در صرفه‌جویی در مصرف آب برای جنگل‌داری و ایجاد فضای سبز در مناطق خشک کشور. انتشارات موسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع، تهران.

Abass M. E., Al-Ghobari H. Tola E. and Al-Gaadi K. A. 2015. Impact of the installation depth on the performance of subsurface irrigation system and its modified version “KISSS” compared to the surface drip irrigation system. ARPN Journal of Agricultural and Biological Science, 10(10).

Alemi M. 1981. Distribution of water and salt in soil under trickle and Pot irrigation. Agricultural water Management, 3: 195-203.

Aquaspa F. 1994. Das ökologische Bewässerungs-System. Friedel&Hilkert GmbH Im Kreuzwinkel 10 64668 Rimbach.

ASAE Standards, 1995. Design and installation of microirrgation systems. Developed by the ASAE subsurface and trickle irrigation committee: approved by the soil and water division standards committee. ASAE EP405.1 DEC94. 720-723.

Barth S. 1988. Gefäßbewässerung Eine Alternative für aride und semiaride Gebiete. Ztschr. f. Bewässerungswirtschaft. 144-164.

Bastani Sh. 1989. Unterflurbewässerung mittels Kuseh-Rohren (Theorie und Materialversuche im Iran) Unveröffentlichte Diplomarbeit, Institut für Wasserwirtschaft und Landschaftsökologie, Universität Kiel.

College of Colorado. Bull. 240, Ft. Collins, CO.
http://kisssamerica.com/Products/KISSS-Flat.(visited 2February 2018).
http://kisssamerica.com/Products/KISSS-Wrap.(visited 2February 2018).
http://www.kissslawnandgarden.com/kisss-wrap-rolls/. (visited 2 February 2018).
Janert H. 1937a. Arbeiten über die Untergrundbewässerung. Verhandlungen der sechsten commission der internationalen bodenkundlichen gesellschaft. Zurich, 1937.Teil B, 260-267.
Janert H. 1937b. Neue Wege der Untergrundbewässerung. D. Kulturtechniker. 40: 2-29.
Janert H. 1955. Der Greifswalder Rohrpflug und seine Arbeitsweise. Ztschr. Wasserwirtschaft-Wassertechnik, Jg. 5, H. 4.
Keller J. and Bliesner R. D. 1990. Sprinkler and trickle irrigation, Avi Book, New York.
Keller J. and Karmel D. 1974. Trickle irrigation design parameters. Transactions of the ASAE, 17(4).
Korneff W. 1932. Das System der Automatischen Bodenbewässerung. Deutsche Landwirtschaftliche Rundschau, 9: 691-692.
Lamm F. R. 2009. Managing the challenges of subsurface drip irrigation. Irrigation Association Technical Conference, San Antonio, Texas.
Lamm F. R. 2014. Technology Transfer from Subsurface Drip Irrigation Studies. KSU Northwest Research-Extension Center.
Lamm F. R., Bordovsky J.P. Schwankl L.J. Grabow G.L. Enciso-Medina J. Peters R.T. Colaizzi P.D. Trooien T.P. and Porter D.O. 2012. Subsurface drip irrigation: Status of the thechnology in 2010. Transactions of the ASABE, 55(2): 483-491.
Lomax K. M. 1988. Emission Characteristics of Porous Tubing. Agricultural Water Management, 15(2): 197-204.
Lovell C. J., Batchelor C. H. and Murata M. 1990. Development of small-scale irrigation using limited groundwater resources. Second Interim Report, report ODA, Institute of Hydrology Wallingford, Oxon, U.K.
Mahbub-ul-Alam M. 1991. Leaky tubing for Subsurface Irrigation. Written for presentation at the International Summer Meeting. ASAE, Paper No. 922158.
Meier E. 1935. Untersuchungen über die Untergrundbewässerung. Diss. Leipzig, Druck von Frommhold & Wendler, Leipzig, D. R. G. M.
Mertin W. 1974. Kosten der Unterflurbewässerung. Landwirt im Ausland 8, H. 3, 55-57.
Mitchell W. H. Stevens R. F. and Williams T. H. 1974. Farm
Bastani Sh. 1998. Unterflurbewässerung mittels Kuseh-Rohren Entwicklung eines neuen Bewässerungssystems mit hoher Wassereffizienz und Bewässerungsversuche in Karadj/Iran. Doktorarbeit. Institut für Wasserwirtschaft und Landschaftsökologie, Universität Kiel.
Batchelor C., Lovell C. and Murata M. 1996. Simple microirrigation techniques for improving irrigation efficiency on vegetable gardens. Agricultural Water Management, 32(1): 37-48.
Baumman H. and Mann G. 1974. Stellungnahme zur unterflurbewasserung nach stander (Gutachten) institut fur wasserwirtschaft und landschaftokologie institut fur wasserwirtschaft und landschaftokologie der Christian-Albrechts- Universitat Kiel.
Camp C.R. 1998. Subsurface drip irrigation: a review. Transactions of the ASAE, 41(5): 1353-1367.
Clark G. A. and Stanly C. D. 1992. Subirrigation by microirrigation. American Society of Association Executives, 8(5): 647-652.
Cole T. E. 1971. Subsurface and trickle irrigation, a survey of potentials and problems (No. ORNL-NDIC--9). Oak Ridge National Laboratory Tennessee (USA). Nuclear Desalination Center.
CSIRO Land and Water. 1998. Controlled Root Zone Irrigation Final Report to Grain Security Foundation.
Damnich A. 1933. Beregnung oder Unterflurbewässerung im Gartenbau? Die Feldbereg-nung, 1. Folge, Berlin, 125.
David A. 1991. Irrigation for remote sites. S. E. R. G.Restoration bulletin. San Diego, CA 22186.
Davis S. 1967. Subsurface irrigation: How Soon a Reality? Agricultural Engineering, 48(11) 654-655.
Dorter K. 1961. Die Entwicklung der Unterflurbewässerung unter besonderer Berücksichtigung der deutschen Verhältnisse. Ztschr. f. Landeskultur, Band 2, H. 1, 25-48.
Edlin F. E. 1970. Mechanical subsoil irrigation – progeress report. Div. Agricultur School of Engineering. Arizona state university, Tempe, August, 1970.
Erdin E. 1972. Versuche mit Unterflurbewässerung im Mediterranen Gebiete der Türkei. Diss. Justus-Liebig-Universität Gießen, Fachbereich Umweltsicherung.
Gerhardt P. 1922. Kulturtechnik, Berlin, Verlag Parey 348.
Goyal M.R. (Ed.). 2014. Sustainable Micro Irrigation: Principles and Practices. CRC Press.
Hettinga S. 1990. Method for forming irrigation pipe having a porous side wall. United-States-Patent. US 4, 931, 236, 5 S. Juni. 5,1990, Applied Mar 10.
House E. B. 1918. Irrigation by means of underground porous pipes. Agricultural Experiment Station of the Agricultural

Stein T. M. 1997. Der Einfluß der Verdunstung, der hydraulichen Leitfähigkeit, der Wanddicke und der Oberfläche auf die Perkolationsrate von Gefäßbewässerung. Ztschr. f. Bewässerungswirtschaft, Jg. 32, H. 1, S. 65-84.

Stein T. M. 2013. Pitcher irrigation bibliography. Available at http://www.vl-irrigation.org. [Verified 5 Jun. 2016].

Stokstad E. 2016. Why Europe may ban the most popular weed killer in the world. http://www.sciencemag.org/news/2016/06/why-europe-may-ban-most-popular-weed-killer-world. (visited 21 February 2018).

Suarez-Rey E.M., Choi C.Y. McCloskey W.B. and Kopec D.M. 2006. Effects of chemicals on root intrusion into subsurface drip emitters. Irrigation and drainage, 55(5): 501-509.

Tamm E. and Schendel U. 1954. Erfahrungen mit der Unterflurbewässerung. Mitt. DLG. 69: 409-411.

Teeluck M. and Sutton B.G. 1998. Discharge characteristics of a porous pipe microirrigation lateral. Agricultural water management, 38(2): 123-134.

Turner J. E. 1975. Poröser Schlauch, insbesondere Bewässerungsschlauch, und Verfahren zu siener Herstellung, Deutsches Patentamt Nr. 2506674 A1. Feb 17, 1975.

Vogler A. 1896. Grundlagen der Kulturtechnik, I ; Verlag Parey Berlin.

Vogler A. 1899. Grundlagen der Kulturtechnik, II; Verl Parey Berlin.

Wagner H. 1938. Untersuchungen über die Untergrundbewässerung. Diss. Universität Leipzig. Verlagsdruckerei Hans Plasnick, Großenhain i. Sa.

Yabe K. and Tanigana T. 1991. Studies on the optimum number of watering plants per porous pipe under the Sub-irrigation methode by using negative pressure difference. Bull. Univ. Osaka Pre. Ser. B. Vol. 44.

Yoder R. E. Mote C. R. and Lamm F. R. 1995. Porous pipe discharge uniformity. p. 750-755. In proceedings Fifth International Microirrigation Congress, Orlando, Florida. April. 1995.

Youssefie G. 1967. Versuche zur Weiterentwicklung der Unterflurbewässerung. Diss. Justus Liebig-Universität Gießen, Fachbereich Umweltsicherung.

Yu Y. Shihong G. Xu D. Jiandong W. and Ma X. 2010. Effects of Treflan injection on winter wheat growth and root clogging of subsurface drippers. Agricultural water management, 97(5): 723-730.

Zabel G. 1983. Experimentation de Techniques d Irrigation en Zone Sahelienne. GTZ, Eschborn/Ts., 1.

Zoldske D. F. 1999. Boot intrusion prevention. Irrigation J. 14-15.

and Garden crop production with trickle irrigation. Ext. Serv. Circ. Al, University of Delaware, Newark, DE, 4.

National academy of sciences, 1974. More water for arid lands, promising technologies and research opportunities. Report of an Ad Hoc Panel of the advisory committee on technology innovation board on science and technology for international development commission on international relations, Washington, D.C. p. 110.

Niederwemmer P. 1964. Lösung des Ernährungsproblems durch Re- und Neo- Kultivierung von ariden und semiariden Böden. Münster /Westf.

Penningsfeld F. and Dequin K. E. 1968. Bewässerungsversuche mit Futterpflanzen in Tunesien. Z. f. Bew. Wirtsch. H2.

Sack R. 1899. Vorschläge zur Reform des Ackerbaues. Leipzig, Verl. Stephan 24 S.

Schachtschabel P. Blume H. P. Brümmer G. Hartge K. H. and Schwertmann U. 1976 . Lehrbuch der bodenkunde. F. Enke.

Schick H. 1990. Erfolgreiche Bewässerungstechnik mit Keramikgefäßen, Keramische Zeitschrift, 42, Jahrgang, Nr.5, 348-349.

Silva D. A. Carvallo H. O. Silva A. S. and Gheyi H. R. 1988. Bewässerung mit porösen Töpfen unter hydrostatischem Druck. Zeitschr. f. Kulturtechnik und Flurbereinigung, 29: 27-35.

Smajstrla A. G. 1992. Field studies of porous pipe microirrigation laterals. American Society of Agricultural Engineers (USA).

Stander W. 1971. Unterirdische Bewässerung im Projekt Nabeul/Tunesien. Landwirt im Ausland 5, H. 1, 14-15.

Stauch F. 1948. An der Grenze der Ertragssteigerung? Neue Mitt. f. d. Landwirtschaft, 3: 490-491.

Stauch F. 1950. Die Untergrund-Nährlösungsbewässerung im praktischen Gebrauch Neue Mitt. f. d. Landwirtschaft, 5: 679-680.

Stauch F. 1952. Untergrundbewässerungsanlage. Deutsche Patentschrift Nr. 849-774.

Stauch F. 1954. Endlich Untergrundbewässerung. Dtsch. Landw. Presse 77, Nr. 23, 324-325, und Nr. 24, 338-339.

Stein C. 1950. Neue Gesichtspunkte bei der landwirtschaftlichen Ent- und Bewässerung. Wasser u.-Boden, 2: 209-212.

Stein C. 1952 a. Aus der Technik der landwirtschaftlichen Bewässerung. Wasserwirtschaft-Wassertechnik, Sonderheft, 2(1): 7-10.

Stein C. 1953. Von der Untergrundbewässerung und dem Einfluß der Bodenfeuchte auf den Boden und das Pflanzenwachstum. Wasserwirtschaft-Wassertechnik, 3: 225-232.

Stein T. M., 1994. Grundlagen und Technik der Gefässbewässerung. Ztschr. f. Bewässerungswirtschaft, Jg. 29, H. 1, 62-94.