تحقیقات منابع آب ایران
Iran-Water Resources Research

سال بیست و دوم، شماره ۱، بهار ۱۴۰۵
Volume 22, No.1, Spring 2026 (IR-WRR)
۱۲۳-۱۴۸

مقاله مروری

فراتحلیل عملکرد آبیاری قطره‌ای زیرسطحی در مقایسه با سایر روش‌های آبیاری

بیتا مروج الاحکامی[۱*]

چکیده

در مناطق با اقلیم خشک و نیمه‌خشک به دلیل تابش شدید آفتاب، تبخیر آب از سطح خاک عمده‌ترین بخش تلفات آب در سیستم‌های آبیاری سطحی است و آبیاری زیرسطحی به عنوان یکی از راهکارهای حذف تلفات تبخیر سطحی مزرعه در این شرایط ارائه شده است. با توجه به گستردگی مطالعات تحقیقاتی در خصوص تأثیر آبیاری قطره‌ای زیرسطحی بر عملکرد محصول و بهره‌وری آب کشاورزی، در این مطالعه، تحلیل آماری- مروری در قالب فراتحلیل عملکرد آبیاری قطره‌ای زیرسطحی انجام شد. به این منظور مطابق با پروتکل PRISMA، از بین مطالعات موجود در بانک اطلاعاتی، ۴۲ مطالعه انتخاب و ارزیابی شد. با توجه به نتایج این مطالعه، اندازه اثر به دست آمده در خصوص مقایسه عملکرد محصول و بهره‌وری آب کشاورزی در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی نسبت به سایر روش‌های آبیاری مثبت و از نظر آماری در سطح ۵ درصد معنی‌دار بود. همچنین اثربخشی آبیاری قطره‌ای زیرسطحی بر بهبود عملکرد محصول و بهره‌وری آب کشاورزی به ترتیب متوسط (۰/۵) و قوی (۱/۲۵) برآورد شد. اثربخشی آبیاری قطره‌ای زیرسطحی در افزایش عملکرد محصول نسبت به آبیاری سطحی کم بود (۰/۲۹۸) و بر اساس فاصله اطمینان به دست آمده معادل [۰/۴۷۴-, ۱/۰۷] معنی‌دار نبود. اندازه اثر کلی بر بهره‌وری آب کشاورزی در مقایسه آبیاری قطره‌ای زیرسطحی نسبت به آبیاری قطره‌ای سطحی و آبیاری سطحی به ترتیب ۱/۳۱و ۱/۲۵ بود که بیانگر قوی بودن اثر آبیاری قطره‌ای زیرسطحی بر افزایش بهره‌وری آب کشاورزی بوده است و فاصله اطمینان تعیین شده نیز حاکی از معنی‌دار بودن این اندازه اثر است.

کلمات کلیدی: آبیاری زیرسطحی، بهره‌وری، عملکرد، فراتحلیل.
تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۱۰/۱۸
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۸/۴

۱- استادیار بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان یزد، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، یزد، ایران.
*- نویسنده مسئول

Review Article

Meta-Analysis of the Subsurface Drip Irrigation Performance Compared to other Irrigation Methods

B. Moravejalahkami[1*]

Abstract

In arid and semi-arid regions, the surface evaporation is the most significant source of water loss in surface irrigation systems, primarily due to the intense sunlight. Subsurface drip irrigation is therefore presented as one of the key solutions for reducing surface evaporation. Due to the varying results found in research studies on the effects of subsurface drip irrigation on crop yield and agricultural water productivity, a meta-analysis was conducted to statistically evaluate its performance. For this study, 42 papers were selected using the PRISMA protocol. The performance of subsurface drip irrigation was then compared to other irrigation methods in terms of crop yield and agricultural water productivity. The results showed that the calculated effect size for both crop yield and agricultural water productivity was positive and statistically significant at the 5% level for subsurface drip irrigation when compared to other irrigation methods. The effectiveness of subsurface drip irrigation in improving crop yield was found to be moderate (0.5), while its effectiveness for agricultural water productivity was high (1.25). However, when compared to surface irrigation, the effectiveness of subsurface drip irrigation in increasing crop yield was low (0.298) and not significant, as indicated by the confidence interval of [-0.474, 1.07]. The overall effect size of subsurface drip irrigation on agricultural water productivity was 1.31 when compared to surface drip irrigation and 1.25 when compared to surface irrigation. Both results demonstrated a strong effect of subsurface drip irrigation on increasing agricultural water productivity, and the confidence intervals confirm that these effects are statistically significant.

Keywords: Productivity, Meta-Analysis, Subsurface Irrigation, Yield.
Received: January 7, 2025
Accepted: October 26, 202

1- Assistant Professor, Soil and Water Research Department, Yazd Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Yazd, Iran. **b.moravej@areeo.ac.ir** / bita.moravej@gmail.com

*- Corresponding Author
Doi: 10.22034/iwrr.2025.498057.2820

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

۱- مقدمه

در مناطق با اقلیم خشک و نیمه‌خشک به دلیل تابش شدید آفتاب، تبخیر آب از سطح خاک عمده‌ترین بخش تلفات آب در سیستم‌های آبیاری سطحی است. به همین دلیل استفاده از سیستم‌های آبیاری زیرسطحی به عنوان یکی از راهکارهای رفع این چالش ارائه شده است. از جمله محاسن آبیاری زیرسطحی می‌توان به کارایی مصرف آب بالاتر، آلودگی کمتر آب‌های زیرسطحی به دلیل کاهش آبشویی نمک‌ها و کاهش خطرات شوری به دلیل جلوگیری از کاهش زیاد پتانسیل آب خاک اشاره کرد. همچنین، یکنواختی بهتر پخش آب، افزایش کمی و کیفی محصول، کنترل علف‌های هرز و بیماری‌های گیاهی، مدیریت مناسب کودها و سموم و کاهش خسارات ناشی از حیوانات از دیگر مزایای کاربرد آبیاری زیرسطحی است (Fan and Li, 2018).

یکی از متداول‌ترین روش‌های آبیاری زیرسطحی، آبیاری قطره‌ای زیرسطحی است که بر اساس مطالعه Mohammad et al. (2014) در این روش آبیاری، آب و مواد مغذی به طور مستقیم در اختیار ریشه گیاه قرار گرفته و ضمن صرفه‌جویی در مصرف آب، منجر به افزایش رضایت‌بخش عملکرد محصول نیز خواهد شد. یکی از مزایای مهم آبیاری قطره‌ای زیرسطحی، کاهش آب مصرفی از طریق کاهش تلفات تبخیرسطحی است. به عنوان مثال در مطالعه انجام شده در اسپانیا با اقلیم نیمه‌خشک، در خصوص ارزیابی آبیاری قطره‌ای زیرسطحی بر عملکرد ذرت، ۳۹ درصد از تبخیرتعرق فصلی گیاه نسبت به سایر سیستم‌های آبیاری بارانی و سطحی کاهش یافت (Mohammadkhani et al., 2020).

یکی از مزایای دیگر آبیاری قطره‌ای زیرسطحی، بهبود وضعیت رطوبت خاک در لایه‌های عمیق خاک است که منجر به افزایش عملکرد محصول خواهد شد. در مطالعات انجام شده در هند، کاربرد آبیاری قطره‌ای زیرسطحی منجر به افزایش عملکرد درختان نارنگی به میزان ۲۹/۲۵ درصد نسبت به آبیاری قطره‌ای سطحی شد که به دلیل بهینه شدن رطوبت خاک در لایه‌های زیرین، افزایش فعالیت ریشه و افزایش برداشت مواد غذایی توسط ریشه عنوان شده است (Meshram et al., 2025). درصد صرفه‌جویی در مصرف آب، افزایش عملکرد محصول و افزایش بهره‌وری آب کشاورزی در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی نسبت به سایر روش‌های آبیاری، بسته به نوع محصول متغیر است. به عنوان مثال صرفه‌جویی در مصرف آب با کاربرد آبیاری قطره‌ای زیرسطحی در نیشکر ۳۱ درصد نسبت به آبیاری جویچه‌ای (Sheini Dashtegol et al., 2020)، در لیمو ۱۹ درصد نسبت به آبیاری قطره‌ای سطحی (Robles et al., 2016) و در پسته به میزان ۳۰ تا ۴۰ درصد نسبت به آبیاری قطره‌ای سطحی (Mohammadi Mohammad Abadi and Abdolahi Ezzat Abadi, 2016) گزارش شده است. نتایج مطالعه Hutmacher et al. (1992) نشان داد که عملکرد یونجه در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی نسبت به آبیاری جویچه‌ای ۲۰ درصد افزایش یافته است. با این وجود در سه مطالعه انجام شده در درختان هلو، تفاوت معنی‌داری در عملکرد محصول بین کاربرد روش آبیاری قطره‌ای سطحی و قطره‌ای زیرسطحی مشاهده نشده است (Bryla et al., 2003; Bryla et al., 2005; Jolaini and Gangimoghadam, 2016). بر اساس مطالعه Robles et al. (2016) در باغات لیمو، استفاده از سیستم آبیاری قطره‌ای زیرسطحی منجر به افزایش بهره‌وری آب شده و میزان صرفه‌جویی در مصرف آب نسبت به سیستم آبیاری سطحی ۱۹ درصد ارزیابی شد. همچنین مطالعات Valentín et al. (2020) حاکی از افزایش ۲۵ درصدی بهره‌وری آب کشاورزی در روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی نسبت به سایر روش‌های آبیاری بارانی و سطحی است. مطالعات در خصوص اجرای روش‌های آبیاری قطره‌ای زیرسطحی در گلخانه برای گوجه‌فرنگی نشان داد که علیرغم بیشتر بودن هزینه نگهداری و سرمایه‌گذاری اولیه در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی، سود حاصل در هر هکتار در طول فصل رشد در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی بیشتر از آبیاری سطحی بوده است (Ahmed et al., 2017).

با توجه به گستردگی مطالعات تحقیقاتی انجام شده در خصوص تأثیر آبیاری قطره‌ای زیرسطحی بر عملکرد محصول و بهرهوری آب کشاورزی، انجام یک مطالعه آماری- مروری در این خصوص امری ضروری است. یکی از روش‌های تحلیل موجود به منظور جمع‌بندی نتایج تحقیقات انجام شده در گذشته و ایجاد یک نتیجه واحد، متاآنالیز یا فراتحلیل است. در این روش، داده‌های جدید تولید نمی‌شوند بلکه داده‌های قدیمی در مطالعات تحقیقاتی مختلف بررسی شده و در شرایط قضاوت صحیح قرار می‌گیرند تا یک نتیجه واحد و مورد تأیید حاصل شود. روش فراتحلیل برای اولین بار در مطالعات روان‌شناسی و پزشکی مورد استفاده قرار گرفت و سپس وارد مباحث بوم‌شناسی شد (Hedges, 1999). این روش در علوم کشاورزی روش تقریبا جدیدی است که اخیرا مطالعاتی از این دست صورت گرفته است (Delbaz et al., 2021). در مطالعه Soltani and Soltani (2014) به لزوم استفاده از روش فراتحلیل در پژوهش‌های علوم زراعی اشاره شده است. بر اساس مطالعه مذکور با این روش می‌توان تحقیقات بی‌شماری که روی یک موضوع خاص مانند تراکم و تاریخ کاشت، مصرف آب و کود و به کارگیری انواع تیمارها انجام شده است را جمع‌بندی نمود و به نتیجه مناسب رسید. در این رابطه می‌توان به مطالعات Atamaleki et al.

(2020) در بررسی تجمع فلزات سنگین در گیاه نعناع آبیاری شده با فاضلاب با استفاده از روش فراتحلیل اشاره کرد. همچنین Delbaz et al. (2021) به فراتحلیل اثربخشی کودآبیاری سطحی و قطره‌ای بر شاخص‌های عملکرد محصول و بهره‌وری آب و کود پرداختند. در مطالعه Lotfifar and Mottaghi (2021) اثر قطع آبیاری در مراحل مختلف نمو بر عملکرد و اجزای عملکرد کلزا با استفاده از فراتحلیل بررسی شده است. همچنین، Ghadami Firouzabadi (2023) از روش فراتحلیل به منظور بررسی و انتخاب سیستم مناسب آبیاری گندم استفاده کرد. Cheng et al. (2021) نیز عملکرد و راندمان آب مصرفی گیاهان را در درختان میوه و سبزیجات تحت آبیاری کامل، کم آبیاری و آبیاری بخشی ریشه بررسی کردند و در این مطالعه از روش فراتحلیل استفاده کردند. Guo et al. (2023) به مطالعه فراتحلیل تأثیر روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی بر بهره‌وری و عملکرد سه محصول گندم، ذرت و پنبه پرداختند.

توجه به این نکته ضروری است که مطالعات مروری انجام شده در گذشته در خصوص سیر تاریخی ابداعات در خصوص آبیاری زیرسطحی (Bastani, 2018)، متمرکز بر یک محصول خاص (Lamm and Trooien, 2003; Devasirvatham, 2009; Lamm, 2016) و یا بدون ارائه مطالعات آماری و مقایسه با روش‌های دیگر آبیاری (Abou Seeda et al., 2020) بوده است. با توجه به اینکه تا کنون در خصوص اثربخشی آبیاری قطره‌ای زیرسطحی در مقایسه با سایر روش‌های آبیاری مطالعه تحلیلی آماری انجام نشده است، در این مطالعه اثربخشی آبیاری قطره‌ای زیرسطحی نسبت به سایر روش‌های آبیاری، با بررسی دو شاخص کلیدی عملکرد محصول و بهره‌وری آب کشاورزی و با بهره‌گیری از روش فراتحلیل ارزیابی شده است. علاوه بر این، در راستای بررسی دقیق‌تر منابع غیرهمگنی، به مقایسه آبیاری قطره‌ای زیرسطحی با آبیاری قطره‌ای سطحی در خصوص بهبود عملکرد محصولات باغی و زراعی به تفکیک پرداخته شده است.

۲- روش تحقیق

به منظور انجام روش فراتحلیل، مطالعه جامع در بانک‌های اطلاعاتی شامل Scopus، Web of Science وGoogle Scholar و در مجلات ScienceDirect، Wiley، Springer و پایگاه‌های داخلی شامل مرکز اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی و ایران داک انجام شد. کلمات کلیدی برای جستجوی مطالعات شامل "آبیاری زیرسطحی[۱]"، "آبیاری قطره‌ای[۲]"، "آبیاری بارانی[۳]"، "آبیاری سطحی[۴]"، "عملکرد محصول[۵]" و "بهره‌وری آب کشاورزی[۶]" بودند. مطابق با شکل (۱) از پروتکل PRISMA[7] به منظور انتخاب مطالعات مناسب برای فراتحلیل استفاده شد (Page et al., 2021). این پروتکل شامل سه مرحله شناسایی[۸]، ارزیابی[۹] و انتخاب[۱۰] مقالات برای مطالعه فراتحلیل است که در شکل (۱) ارائه شده است. با توجه به شکل (۱) در جستجوی اولیه، ۱۱۰۰ مقاله انتخاب شدند و مطالعات تکراری و مطالعاتی که در آنها آبیاری قطره‌ای زیرسطحی ارزیابی نشده بود، حذف شدند (حذف ۷۲۵ مطالعه تکراری). با توجه به اینکه هدف این مقاله، مقایسه عملکرد محصول و بهره‌وری آب کشاورزی در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی با سایر روش‌های آبیاری است، در گام بعد مطالعاتی که در آنها مقایسه بین روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی و سایر روش‌های آبیاری وجود نداشت نیز حذف شدند (۲۱۰ مطالعه). در گام نهایی، مطالعات بدون تکرار در روند آزمایشات مربوط به روش‌های آبیاری حذف شدند (۱۲۳مطالعه) به این ترتیب تعداد مطالعات باقی‌مانده برای انجام روش فراتحلیل ۴۲ مطالعه بود که ۳۸ مطالعه به منظور مقایسه آبیاری قطره‌ای زیرسطحی با سایر روش‌های آبیاری از نظر تأثیر بر عملکرد محصول و ۱۷ مطالعه به منظور مقایسه آبیاری قطره‌ای زیرسطحی با سایر روش‌های آبیاری از نظر تأثیر بر بهره‌وری آب کشاورزی در فرایند فراتحلیل ارزیابی شدند (جدول ۱). توجه به این نکته ضروری است که در مطالعات منتخب، بهره‌وری آب کشاورزی عبارت است از مقدار محصول تولید شده (کیلوگرم) نسبت به آب مصرفی (مترمکعب) که این مفهوم به صورت یکسان در کلیه مطالعات در نظر گرفته شده بود.

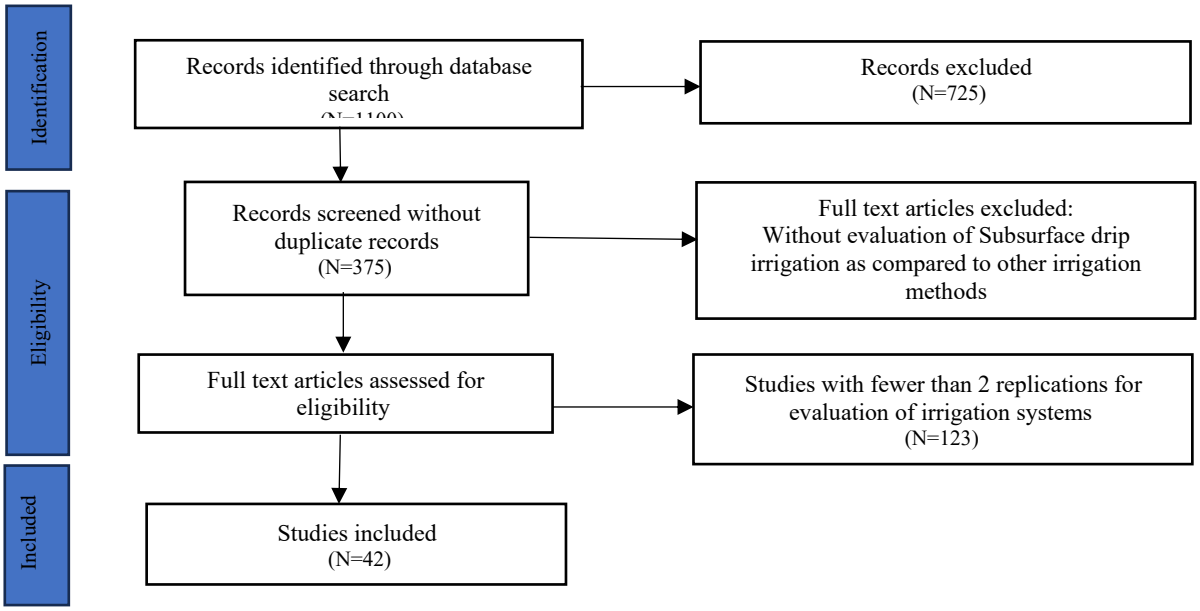


Fig. 1- Flow chart of publication selection for the meta-analysis using PRISMA protocol

شکل ۱- نمایی از روند انتخاب مطالعات در فرایند فراتحلیل با استفاده از پروتکل PRISMA (Identification: مرحله شناسایی، Eligibility: مرحله ارزیابی، Included: مرحله انتخاب)

Table 1- The details of the selected studies for Meta-analysis

جدول ۱- جزییات مطالعات انتخابی برای فراتحلیل

Study code	Location	Crop	Soil texture	Retrieved data numbers	Reference
2	California	Peach	Sandy Loam	6	(Bryla et al., 2005
3	Iran-Mashhad	Peach	Loam/ Sandy Loam	6	Jolaini and Gangimoghadam, 2016
4	Egypt	Orange	Sandy	12	Esmail et al., 2016
5	Iran-Karaj	Maize	Sandy Clay Loam	4	Liaghat et al., 2018
6	Spain	Maize	Clay Loam	4	Valentine et al., 2019
7	Iran-Karaj	Maize	Sandy Loam/Sandy clay Loam	6	Mohammadkhani et al., 2020
9	Serbia	Onion	-	9	Pejic et al., 2018
10	China	Jujube	Sandy Loam	23	Sun et al., 2016
12	Spain	Lemon	Clay Loam	4	Robles et al., 2016
13	Turkey	Soybean	Loam	12	Aydinsakir et al., 2021
14	China	Pepper	Silty Loam	32	Kong et al., 2012
15	Saudi-Arabia	potato	Sandy Loam	12	Mattar et al., 2021
16	Egypt	Potato	Sand	6	Selim., 2009
17	Spain	Olive	Sandy Loam	54	Martínez and Reca, 2014
18	Saudi-Arabia	Dates	Sandy Loam	5	Mohammed et al., 2020
19	Saudi-Arabia	Tomato	Sandy Loam	4	Ahmed et al., 2017

20	Greece	Sugarcane	Loam/ Clay Loam	4	Sakrllariou-Makrantontaki et al., 2002
21	Turkey	Eggplant	Silty Clay	64	Çolak et al., 2018
22	Italy	Grape	Sandy Loam	6	Pisciotta et al., 2018
23	China	Maize	Silty Loam	8	Wang et al., 2020
24	Saudi-Arabia	Tomato	Sandy Loam	6	Al-Ghobari et al., 2018
25	California	Pomegranate	Sandy Loam	4	Zhang et al., 2017
26	Saudi-Arabia	Dates	Sandy Loam	6	Ahmed et al., 2012
27	India	Onion	Sandy Loam	18	Patel et al., 2009
28	China	Maize	Sandy Loam	4	Cao et al., 2022
29	Egypt	Onion	Clay	4	Soliman et al., 2020
30	India	Pumpkin	Sandy Loam	12	Mali et al., 2017
31	Turkey	Melon	Clay	24	Dogan et al., 2008
32	South Carolina	Maize	Loamy Sand	6	Stone et al., 2008
33	India	Okra	Clay Loam	20	Vadar et al., 2019
34	India	Okra	Sandy Loam	48	Singh et al., 2007
36	North Carolina	Cotton	Sandy Loam	10	Grabow et al, 2006
40	Kansas	Alfalfa	Loam	12	Alam et al., 2003
44	California	Tomato	-	8	Schmidt et al., 2018
45	South Asia	Maize	Sandy Loam	16	Patra et al., 2021
46	Arizona	Lettuce	–	8	Song et al., 2003
47	Texas	Onion	Silty Clay Loam	4	Enciso et al., 2015
48	China	Maize	Silty Loam	8	Wang et al., 2020
49	United States	Cotton	Sandy Loam	5	Whitaker et al., 2008
50	Pakistan	Sugarcane	Sandy Loam	6	Hussain et al., 2010
51	Texas	Cotton	loam	18	Bordovsky et al., 2003
52	China	Alfalfa	Sandy Loam	24	Fu et al., 2021

۲-۱- تئوری

به منظور انجام مطالعات فراتحلیل، پارامترهای آماری اندازه اثر[۱۱]، خطای استاندارد[۱۲] و فاصله اطمینان[۱۳] ۹۵ درصد تعیین شد. برای انجام فراتحلیل در این مطالعه از زبان برنامه‌نویسی پایتون و کتابخانه Pandas برای مدیریت و تحلیل داده‌های ورودی در قالب فایل اکسل و محاسبات اندازه اثر و خطای استاندارد، کتابخانه NumPy برای محاسبات عددی مانند اندازه اثر Cohens d، کتابخانه Matplotlib برای رسم نمودارهای جنگلی و قیفی، کتابخانه Scipy.stats برای محاسبه P-Value و کتابخانه Statsmodels برای انجام آزمون Egger استفاده شد.

لازم به ذکر است که منظور از تیمار در این مطالعه آبیاری قطره‌ای زیرسطحی و منظور از شاهد سایر روش‌های آبیاری است. همچنین پارامترهای مورد بررسی، عملکرد محصول و بهره‌وری آب کشاورزی بودند. به طور کلی مطالعات فراتحلیل در چهار بخش انجام شد:

بخش اول: بررسی اثربخشی آبیاری قطره‌ای زیرسطحی بر عملکرد محصول و بهره‌وری آب کشاورزی در مقایسه با سایر روش‌های آبیاری (کلیه روش‌های آبیاری قطره‌ای سطحی، آبیاری سطحی و آبیاری بارانی)؛
بخش دوم: بررسی اثربخشی آبیاری قطره‌ای زیرسطحی بر عملکرد محصول و بهره‌وری آب کشاورزی در مقایسه با آبیاری قطره‌ای سطحی؛
بخش سوم: بررسی اثربخشی آبیاری قطره‌ای زیرسطحی بر عملکرد محصول و بهره‌وری آب کشاورزی در مقایسه با آبیاری سطحی؛
بخش چهارم: بررسی اثربخشی آبیاری قطره‌ای زیرسطحی بر عملکرد محصول در مقایسه با آبیاری بارانی.
وزن‌دهی به مطالعات بر اساس خطای استاندارد انجام شد. به این صورت که مطالعاتی که دارای خطای استاندارد کمتری هستند به دلیل اینکه دقت بیشتری دارند، وزن بیشتری خواهند داشت.

$$w_i = \frac{1}{SE_i^2} \quad (۱)$$

که در اینجا SE_i^2: خطای استاندارد اندازه اثر در مطالعه iام است که به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$SE_i = \sqrt{\frac{1}{n_{treatment}} + \frac{1}{n_{control}} + \frac{d^2}{2(n_{treatment}+n_{control})}} \quad (۲)$$

که در اینجا $n_{treatment}$: تعداد تیمار در مطالعه، $n_{control}$: تعداد شاهد در هر مطالعه، d: شاخص انداز اثر کوهن[۱۴] که به صورت زیر بیان می‌شود (Akbari Zardkhane et al., 2016):

$$d = \frac{Mean_{treatment} - Mean_{control}}{\sqrt{\frac{sd_{treatment}^2 - sd_{control}^2}{2}}} \quad (۳)$$

که در اینجا $Mean_{control}$: میانگین عملکرد یا بهره‌وری آب کشاورزی در شاهد (سایر روش‌های آبیاری)، $Mean_{treatment}$: میانگین عملکرد یا بهره‌وری آب کشاورزی در تیمار (آبیاری قطره‌ای زیرسطحی)، SD: انحراف معیار عملکرد یا بهره‌وری آب کشاورزی در شاهد یا تیمار که به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$SD = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})}{n-1}} \quad (۴)$$

که در اینجا X_i: مقادیر مشاهده شده (شاهد یا تیمار در هر مطالعه)، $\bar{x}$: میانگین مشاهدات (شاهد یا تیمار در هر مطالعه)، n: تعداد نمونه‌ها در هر مطالعه
همگنی نتایج مطالعات با استفاده از پارامترهای I^2، H^2 و τ^2 به صورت زیر بررسی شد:

$$I^2 = 100 * \frac{Q - df}{Q} \quad (۵)$$

که در اینجا: I^2: شاخص غیرهمگنی است که به طور مستقیم تغییرات بین نتایج مطالعات را بیان می‌کند. به طور کلی چنانچه مقدار این پارامتر بزرگتر از ۵۰ درصد شود، در مطالعات غیرهمگنی زیادی ایجاد خواهد شد (Higgins and Thompson, 2002).
Q: این پارامتر به منظور بررسی ناهمگنی بین مطالعات به صورت زیر محاسبه می‌شود (Gavaghan et al., 2000):

$$Q = \sum_{i=1}^{k} w_i \ (d_i - \bar{d})^2 \quad (۶)$$

که در اینجا، K: تعداد مطالعات، W_i: وزن هر مطالعه، d_i: اندازه اثر هر مطالعه، $\bar{d}$: میانگین وزنی اندازه اثرها و df: درجه آزادی هستند.

$$Q = \sum_{i=1}^{k} w_i \ (d_i - \bar{d})^2 \quad (۷)$$

H^2: نسبت غیرهمگنی. چنانچه این پارامتر بزرگ‌تر از ۱ شود، بیانگر غیرهمگنی است (Higgins et al., 2002).

$$\tau^2 = \max\left(0, \frac{Q - df}{\sum w_i}\right) \quad (۸)$$

τ^2: واریانس اثرات تصادفی که به منظور ارزیابی تفاوت‌ها بین مطالعات می‌پردازد (Higgins et al., 2002).
به منظور بررسی سوگیری انتشارات از آزمون Egger استفاده شد. این روش بر اساس رگرسیون خطی از مقادیر معکوس خطای استاندارد بر روی اندازه اثرها انجام می‌شود. فرض صفر در این آزمون این است که هیچ سوگیری انتشاری وجود ندارد. وجود رابطه معنی‌دار بین اندازه اثر و خطای استاندارد در این رگرسیون، نشان‌دهنده سوگیری انتشار است. بنابراین P-Value کمتر از ۰/۰۵ نشان‌دهنده وجود سوگیری انتشار خواهد بود (Egger et al., 1997).

۳- نتایج و تحلیل نتایج

فراتحلیل در این مطالعه با هدف بررسی اثربخشی آبیاری قطره‌ای زیرسطحی بر عملکرد و بهره‌وری آب کشاورزی نسبت به سایر روش‌های آبیاری قطره‌ای سطحی، آبیاری بارانی و آبیاری سطحی مطابق با جدول (۲) انجام شد. در جدول (۲) تعداد مطالعات دارای خطای استاندارد بیشتر از یک برای هر بخش ارائه شده است که نشان‌دهنده دقت کم اندازه‌گیری‌ها در مطالعات موردنظر است. خطای استاندارد بیشتر از یک در این مطالعات به دلیل تکرار کم تیمار و شاهد (۲ تکرار) در آن مطالعات است. در برخی مطالعات، اندازه اثر، منفی به دست آمد که بیانگر عدم اثربخشی آبیاری قطره‌ای زیرسطحی بر عملکرد محصول نسبت به روش‌های دیگر آبیاری بوده است. البته با توجه به فاصله اطمینان به دست آمده در این مطالعات اندازه اثر در سطح ۵ درصد معنی‌دار نبود ($P\text{-}Value_i > 0.05$).

Table 2- The number of studies eligible for meta-analysis in each study group
جدول ۲- تعداد مطالعات واجد شرایط فراتحلیل در هر بخش مطالعاتی

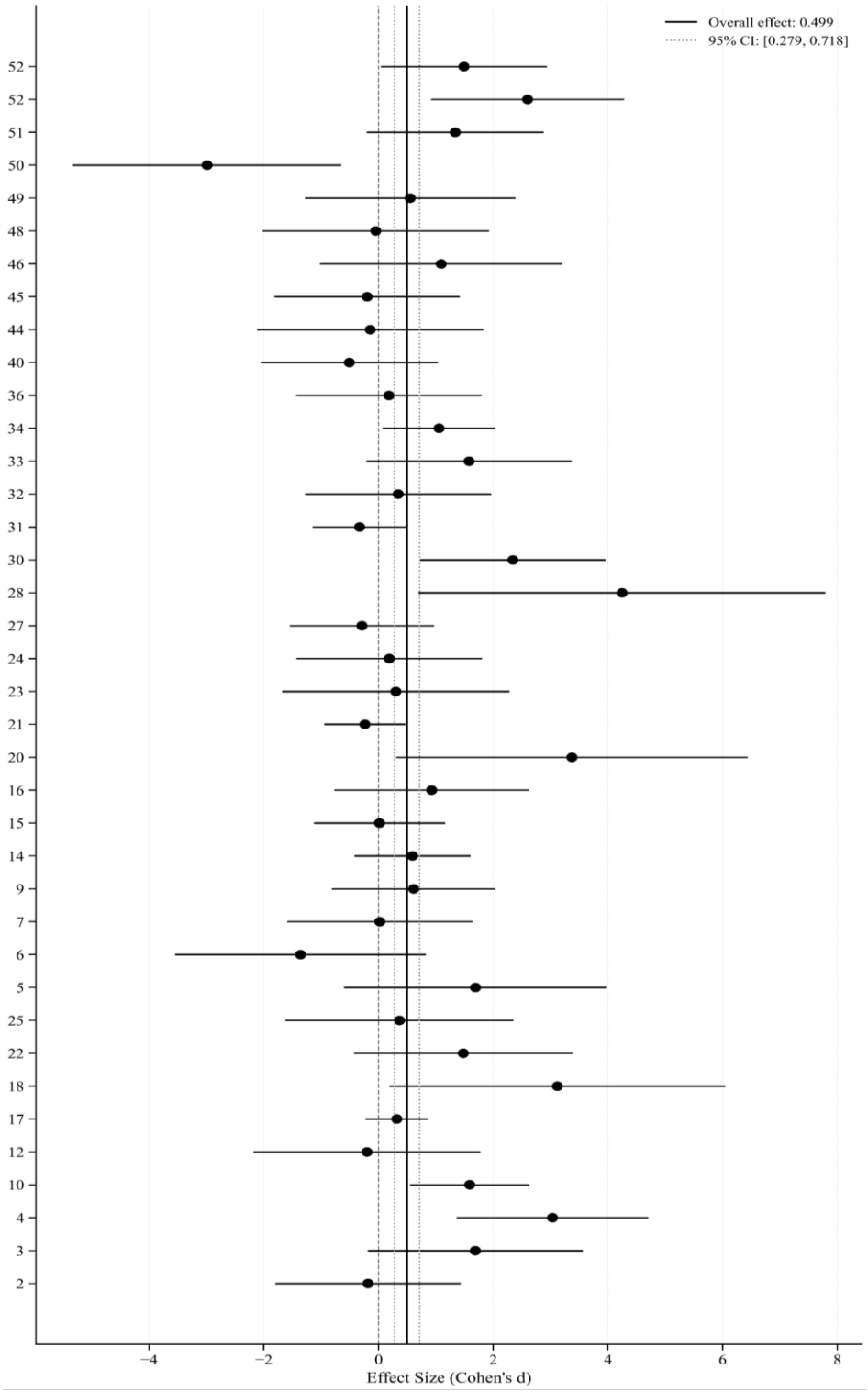
Title of each study group	Investigated parameter	The number of Studies	The number of studies with standard error more than one	The number of studies with negative effect size
Comparison of subsurface drip irrigation with other irrigation methods	Crop Yield	38	12	11($P\text{-}Value_i>0.05$)
	Agricultural Water Productivity	17	9	3($P\text{-}Value_i>0.05$)
Comparison of subsurface drip irrigation with surface drip irrigation	Crop Yield	27	12	6($P\text{-}Value_i>0.05$)
	Agricultural Water Productivity	10	4	2($P\text{-}Value_i>0.05$)
Comparison of subsurface drip irrigation with surface irrigation	Crop Yield	6	4	4($P\text{-}Value_i>0.05$)
	Agricultural Water Productivity	5	4	1($P\text{-}Value_i>0.05$)
Comparison of subsurface drip irrigation with sprinkler irrigation	Crop Yield	5	0	1($P\text{-}Value_i>0.05$)

در خصوص مطالعات واجد شرایط برای مطالعات فراتحلیل، تحلیل حساسیت انجام شد که نشان داد در خصوص مطالعات مربوط به اثربخشی آبیاری قطره‌ای زیرسطحی بر عملکرد و بهره‌وری آب کشاورزی نسبت به سایر روش‌های دیگر، حذف هیچ یک از مطالعات تأثیر معنی‌داری بر اندازه‌اثر نهایی حاصل از فراتحلیل نداشته است که این نتیجه پایداری نتایج حاصل را تأیید می‌کند.

۳-۱- بررسی نتایج فراتحلیل در اثربخشی آبیاری قطره‌ای زیرسطحی بر عملکرد محصول

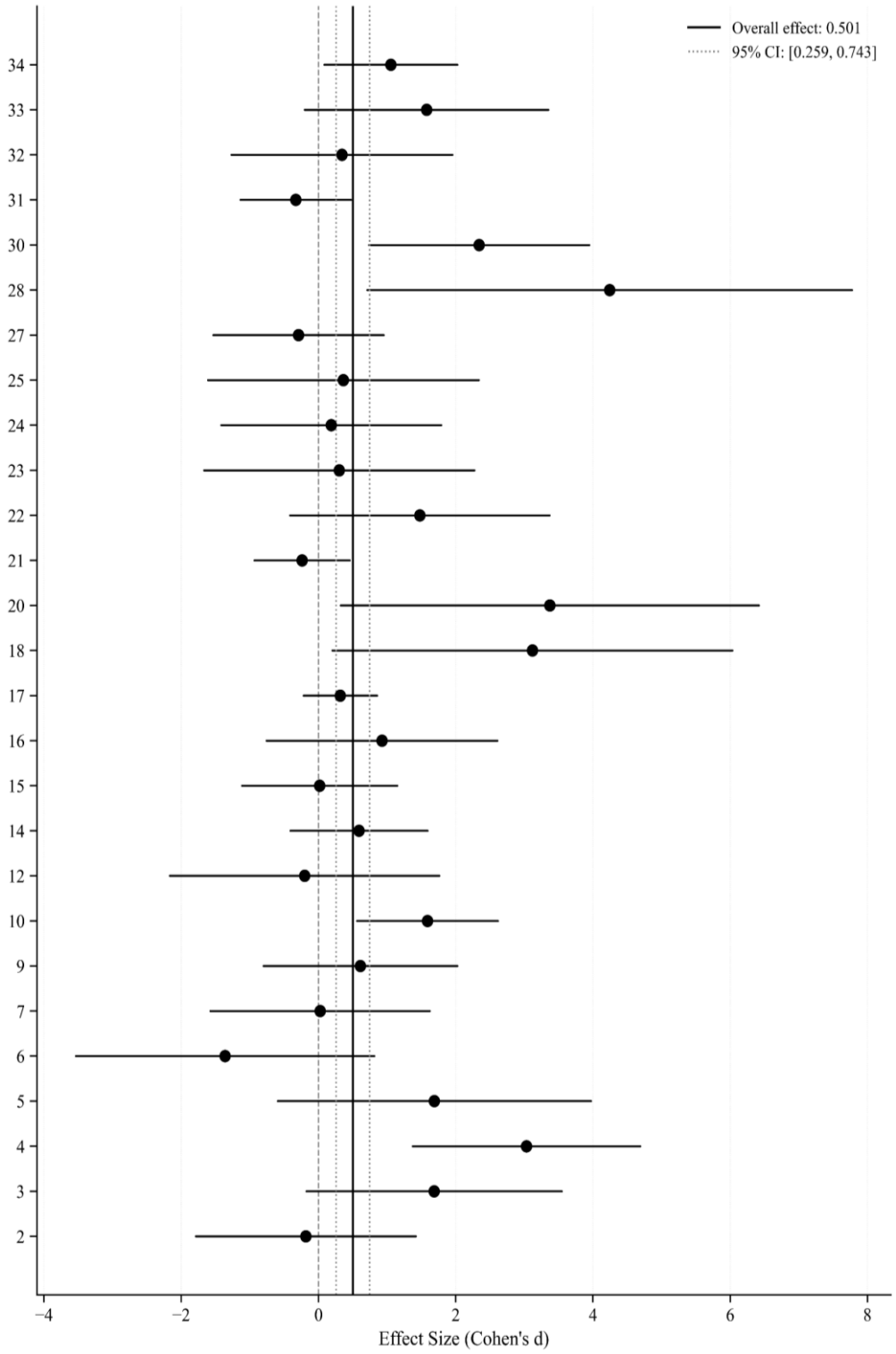
در شکل (۲) نتایج مقایسه اثربخشی آبیاری قطره‌ای زیرسطحی با سایر روش‌های آبیاری بر عملکرد محصول در قالب نمودار جنگلی[۱۵] و جدول ارزیابی همگنی (Q، I^2، H^2 و τ^2) ارائه شده است. با توجه به جدول ارائه شده در شکل (2-A) مقادیر آماره‌های همگنی (Q، I^2 و τ^2،H^2) بیان‌کننده غیرهمگنی بین مطالعات مربوط به مقایسه آبیاری قطره‌ای زیرسطحی با سایر روش‌های آبیاری (شامل آبیاری قطره‌ای سطحی، آبیاری بارانی و آبیاری سطحی) است. با توجه به مقدار پارامتر Q (۷۲/۹) مطالعات با دقت کم (۱۲ مطالعه با خطای استاندارد بیشتر از ۱) حذف شدند و اثربخشی آبیاری قطره‌ای زیرسطحی بر عملکرد محصول در مقایسه با سایر روش‌های آبیاری مجددا مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاکی از کاهش قابل توجه پارامتر Q (۴۷/۶) بود که بیانگر اثرگذاری مطالعات با خطای استاندارد زیاد بر غیرهمگنی است. البته حذف این مطالعات در مقدار اندازه اثر کلی و سایر آماره‌های همگنی تأثیرگذار نبود. بررسی همگنی با توجه به جداول ارائه شده در شکل‌های (2-B)، (2-C) و (2-D) نیز بیانگرغیرهمگنی بین مطالعات در مقایسه آبیاری قطره‌ای زیرسطحی با آبیاری قطره‌ای سطحی، آبیاری سطحی و آبیاری بارانی است. هر چند مقادیر P-Value در این مقایسات نیز حاکی از معنی‌دار نبودن غیرهمگنی بین مطالعات است.

A



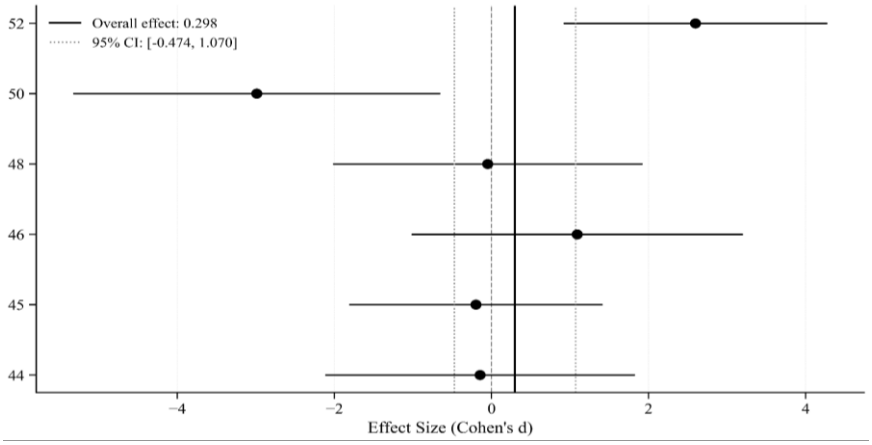
Q	P-Value	I^2	H^2	τ^2
72.9	0.24	47.87	1.9	0.42

B



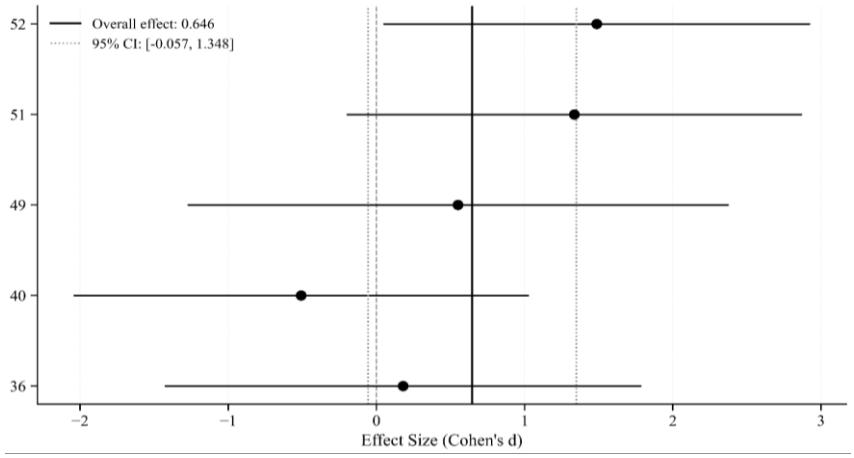
Q	P-Value	I^2	H^2	τ^2
51.4	0.25	49.4	1.98	0.39

C



Q	P-Value	I^2	H^2	τ^2
16.7	0.25	69	3.23	1.73

D



Q	P-Value	I^2	H^2	τ^2
4.6	0.27	13.2	1.15	0.078

Fig. 2- The forest plot and the results of homogeneity analysis for comparing the crop yield of subsurface drip irrigation with other irrigation methods (38 studies) (A), Surface drip irrigation (27 studies) (B), Surface irrigation (6 studies) (C), Sprinkler irrigation (5 studies) (D)

شکل ۲- نمودار جنگلی و نتایج آنالیز همگنی مقایسه عملکرد محصول در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی نسبت به سایر روش‌های آبیاری (۳۸ مطالعه) (A)، آبیاری قطره‌ای سطحی (۲۷ مطالعه) (B)، آبیاری سطحی (۶ مطالعه) (C) و آبیاری بارانی (۵ مطالعه) (D)

در شکل‌های (2-A)، (2-B) و (2-C) با توجه به مقادیر آماره‌های I^2، H^2 و τ^2 غیرهمگنی متوسط و پایین در مقایسه آبیاری قطره‌ای زیرسطحی به ترتیب با سایر روش‌های آبیاری، آبیاری قطره‌ای زیرسطحی و بارانی ارائه شده است؛ ولی در شکل (2-C) این غیرهمگنی برای مقایسه آبیاری قطره‌ای زیرسطحی با آبیاری سطحی بالاست که بیانگر تأثیر شرایط مطالعه مانند عوامل فنی، محیطی و مدیریتی در آبیاری سطحی است؛ اگر چه با توجه به مقادیر P-Value ارائه شده، این غیرهمگنی بین مطالعات غیرمعنی‌دار است. این نتایج نشان می‌دهد که شدت غیرهمگنی بین مطالعات بر اساس نوع مقایسه متفاوت است که به دلیل قدرت آماری پایین تست Q در نمونه‌های کوچک است و استفاده از مدل اثرات تصادفی در این مطالعه را توجیه می‌کند.

با توجه به نمودار جنگلی ارائه شده در شکل (۲) اندازه اثر کلی در مقایسه آبیاری قطره‌ای زیرسطحی نسبت به سایر روش‌های آبیاری، آبیاری قطره‌ای سطحی، آبیاری سطحی و آبیاری بارانی به ترتیب ۰/۵، ۰/۵، ۰/۲۹۸ و ۰/۶۴۸ بوده است. بر اساس شکل (2-A) اثربخشی آبیاری قطره‌ای زیرسطحی بر افزایش عملکرد محصول نسبت به کل روش‌های آبیاری قطره‌ای سطحی، بارانی و سطحی متوسط و با توجه به فاصله اطمینان به دست آمده (P-Value < 0.05) معنی‌دار است. با توجه به مطالعات منتخب در فرایند فراتحلیل، با کاربرد آبیاری قطره‌ای زیرسطحی متوسط عملکرد محصول ۵/۸ درصد نسبت به سایر روش‌های آبیاری افزایش یافته است. همچنین با توجه به اندازه اثر به دست آمده در شکل (2-B) اثربخشی آبیاری قطره‌ای زیرسطحی بر افزایش عملکرد محصول نسبت به آبیاری قطره‌ای سطحی متوسط و معنی‌دار بوده است. متوسط عملکرد محصول با کاربرد آبیاری قطره‌ای زیرسطحی نسبت به آبیاری قطره‌ای سطحی ۱۱/۴ درصد افزایش یافته است. به طور مشابه بر اساس نتایج Jolaini and Gangimoghadam (2016) در خصوص ارقام هلو (اسپرینگ تایم و سبز مشهد)، عمکرد محصول در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی ۷ درصد نسبت به آبیاری قطره‌ای سطحی افزایش یافت، هر چند این افزایش معنی‌دار نبود. همچنین بر اساس مطالعه مروری انجام شده توسط (Lamm, 2016) عملکرد گوجه‌فرنگی در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی ۷ درصد بیشتر از آبیاری قطره‌ای سطحی ارزیابی شد. البته مطالعه Pejic et al. (2018) در خصوص مقایسه آبیاری قطره‌ای زیرسطحی و قطره‌ای سطحی برای پیاز نشان داد که برتری آبیاری قطره‌ای زیرسطحی بسته به عمق کارگذاری لوله‌های آبیاری قطره‌ای زیرسطحی است به گونه‌ای که با کارگذاری لوله‌ها در عمق ۵ سانتی‌متری عملکرد محصول کاهش و با کارگذاری در عمق ۱۰ سانتی‌متری عملکرد محصول ۹ درصد افزایش یافت. نتیجه این مطالعه نشان می‌دهد که اثربخشی آبیاری قطره‌ای زیرسطحی، کاملاً به مدیریت صحیح آن، به‌ویژه عمق کارگذاری لوله‌ها، وابسته است و این یکی از عوامل اصلی غیرهمگنی در فراتحلیل است.

بر اساس نتایج مطالعات انتخاب شده برای فراتحلیل در مطالعه حاضر، متوسط عملکرد محصول با کاربرد آبیاری قطره‌ای زیرسطحی نسبت به آبیاری سطحی۳۴/۵ درصد کاهش یافته است. به طور مشابه بر اساس مطالعه Shrestha et al. (2007) عملکرد کل و بازارپسندی گوجه‌فرنگی به ترتیب ۳۳ و ۴۶ درصد در آبیاری جویچه‌ای بیشتر از آبیاری قطره‌ای زیرسطحی گزارش شد. Meng et al. (2020) نیز به طور مشابه کاهش ۲۸/۳ درصدی عملکرد گوجه‌فرنگی در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی را نسبت به روش آبیاری جویچه‌ای گزارش کردند. با این حال، در مطالعه حاضر بر اساس اندازه اثر به دست آمده در فراتحلیل (۰/۲۹۸ با توجه به شکل (2-C)) اثربخشی آبیاری قطره‌ای زیرسطحی بر عملکرد محصول نسبت به آبیاری سطحی مثبت و کم بوده و بر اساس فاصله اطمینان به دست آمده معنی‌دار نیست.

بر اساس مطالعات انتخاب شده برای فراتحلیل، متوسط عملکرد محصول با کاربرد آبیاری قطره‌ای زیرسطحی نسبت به آبیاری بارانی ۷۷/۸ درصد افزایش یافته است. با توجه به اندازه اثر به دست آمده از فراتحلیل در مطالعه حاضر (۰/۶۴۶) بیشترین اثربخشی آبیاری قطره‌ای زیرسطحی بر افزایش عملکرد نسبت به آبیاری بارانی بوده است، هر چند بر اساس فاصله اطمینان به دست آمده این اندازه اثر هم از نظر آماری معنی‌دار نبوده است

با توجه به موارد ذکر شده در بالا ارائه یک مقاله صرفا مروری و گزارش کیفی و در نظر گرفتن صرفا متوسط داده‌های مطالعات متفاوت منجر به ارائه نتایج غیردقیق خواهد شد و ارائه یک مطالعه در قالب فراتحلیل و استفاده از تحلیل‌های آماری امری ضروری است.

به منظور بررسی سوگیری انتشارات نمودار قیفی[۱۶] و نتایج آزمون Egger در شکل (۳) ارائه شده است.

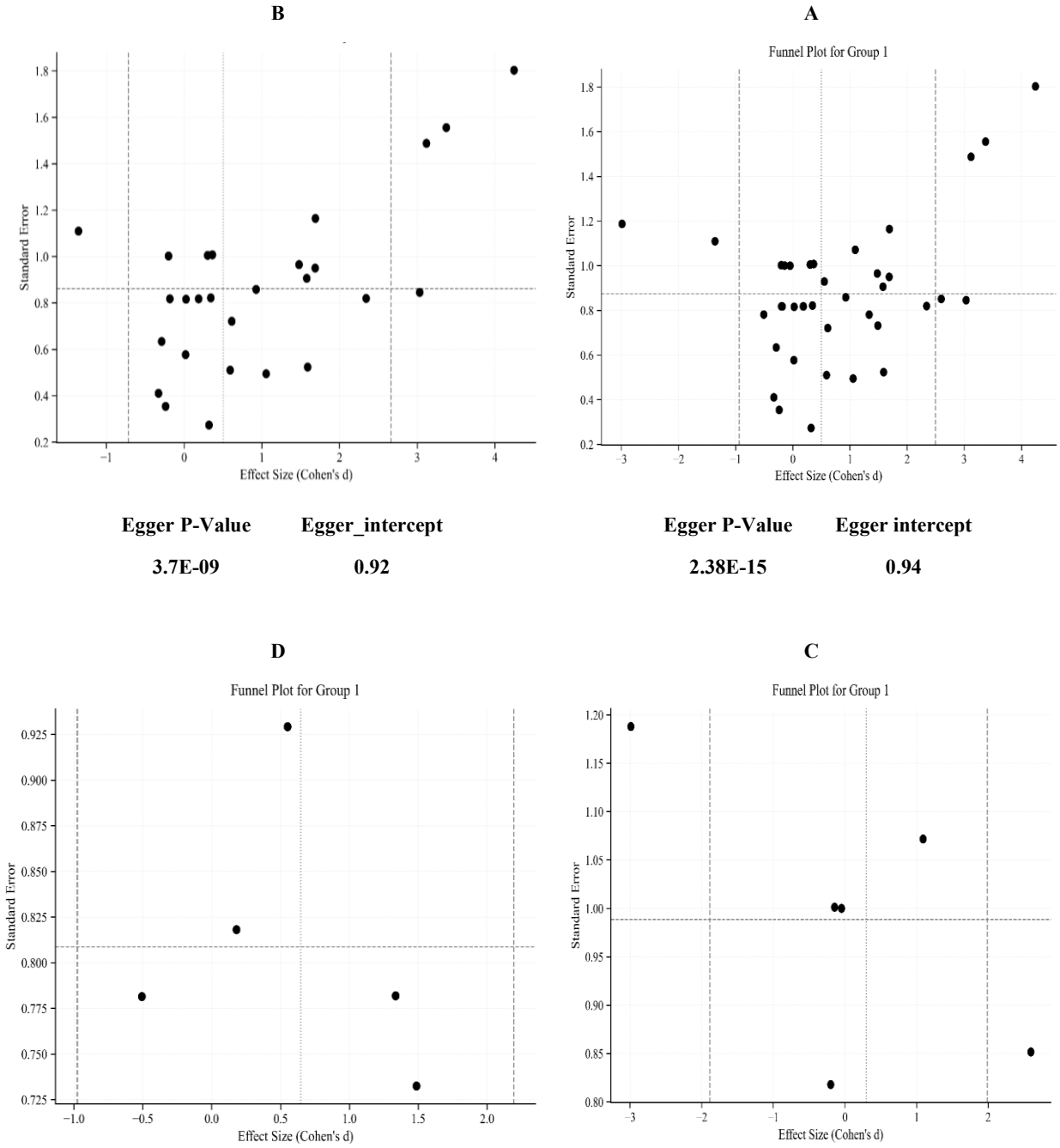


Fig. 3- The funnel plot and the results of Egger analysis for comparing the crop yield of subsurface drip irrigation with other methods of irrigation (A), Surface drip irrigation (B), Surface irrigation (C), Sprinkler irrigation (D)

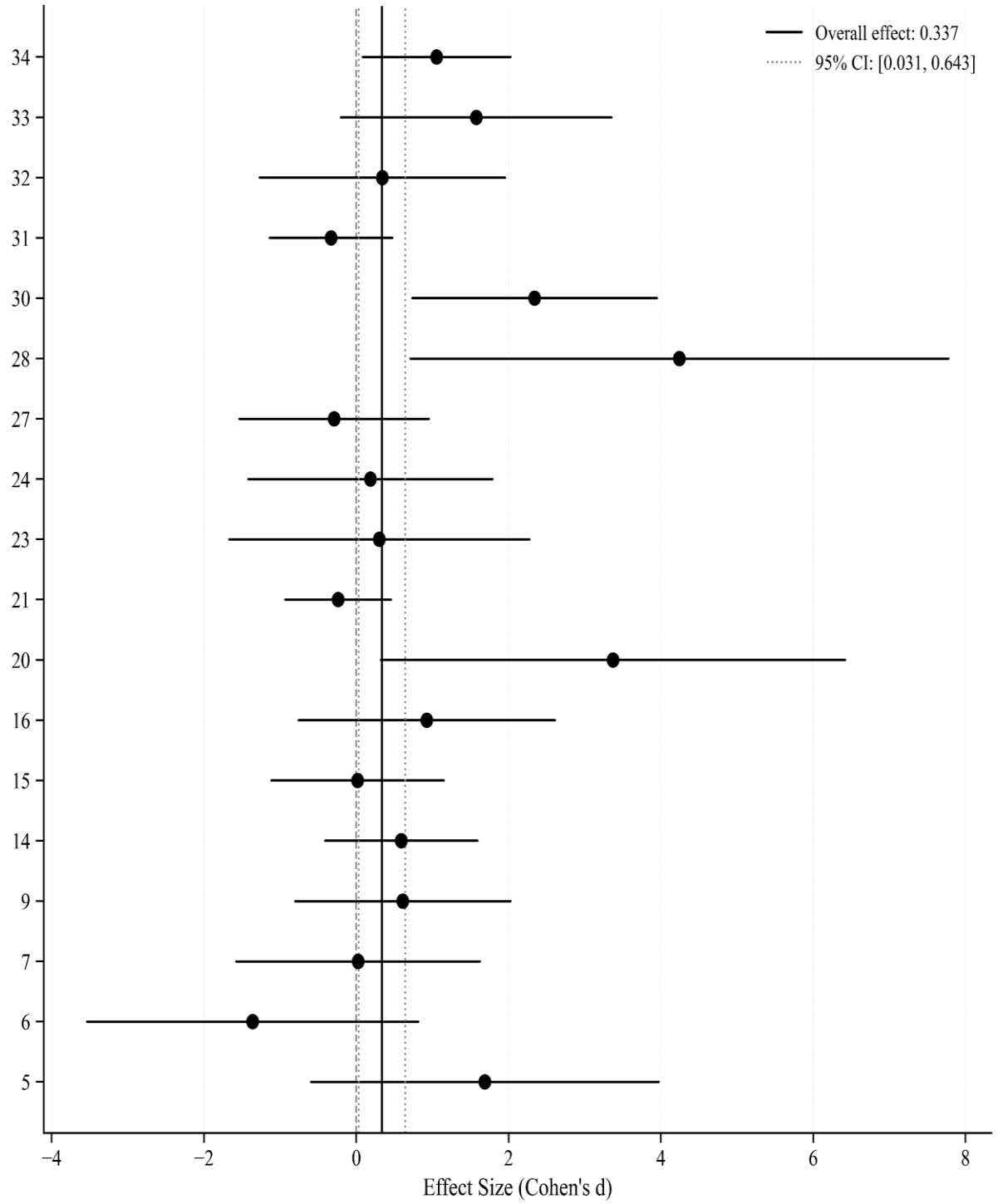
شکل ۳- نمودار قیفی و نتایج آزمون Egger مقایسه عملکرد محصول در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی نسبت به سایر روش‌های آبیاری (A)، آبیاری قطره‌ای سطحی (B)، آبیاری سطحی (C) و آبیاری بارانی (D)

بر اساس شکل‌های (3-A, 3-B, 3-D) بیشتر مطالعات به سمت اندازه اثر مثبت منحرف شده‌اند. یعنی بیشتر مطالعات، اثربخشی آبیاری قطره‌ای زیرسطحی بر افزایش عملکرد را گزارش کرده‌اند. بر اساس نتایج آزمون Egger نیز سوگیری انتشارات وجود داشته است که به دلیل عدم گزارش یا عدم انتشار اندازه اثرهای منفی در مقایسه آبیاری قطره‌ای زیرسطحی نسبت به سایر روش‌های آبیاری، روش آبیاری قطره‌ای سطحی و آبیاری بارانی بوده است. در شکل (3-C) بیشتر مطالعات به سمت اندازه اثر منفی منحرف شده‌اند. به این معنی که بیشتر مطالعات کاهش عملکرد محصول در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی را نسبت به آبیاری سطحی گزارش کرده‌اند. با توجه به نتایج آزمون Egger، سوگیری انتشارات تأیید می‌شود که به دلیل کمبود تعداد مطالعات واجد شرایط یا عدم گزارش و عدم انتشار اندازه اثرهای مثبت در مقایسه آبیاری قطره‌ای زیرسطحی و آبیاری سطحی بوده است. به طور مشابه در مطالعه Yu et al. (2020) در خصوص فراتحلیل اثربخشی کم‌آبیاری بر بهبود عملکرد و کارایی مصرف آب گندم، سوگیری انتشارات مشاهده شده ناشی از محدود بودن مطالعات در این زمینه در کشورهای متفاوت و پر تکرار بودن مطالعات در برخی کشورها مانند چین عنوان شده است.

۳-۱-۱ بررسی نتایج فراتحلیل در اثربخشی آبیاری قطره‌ای زیرسطحی به تفکیک بر عملکرد محصولات زراعی و باغی

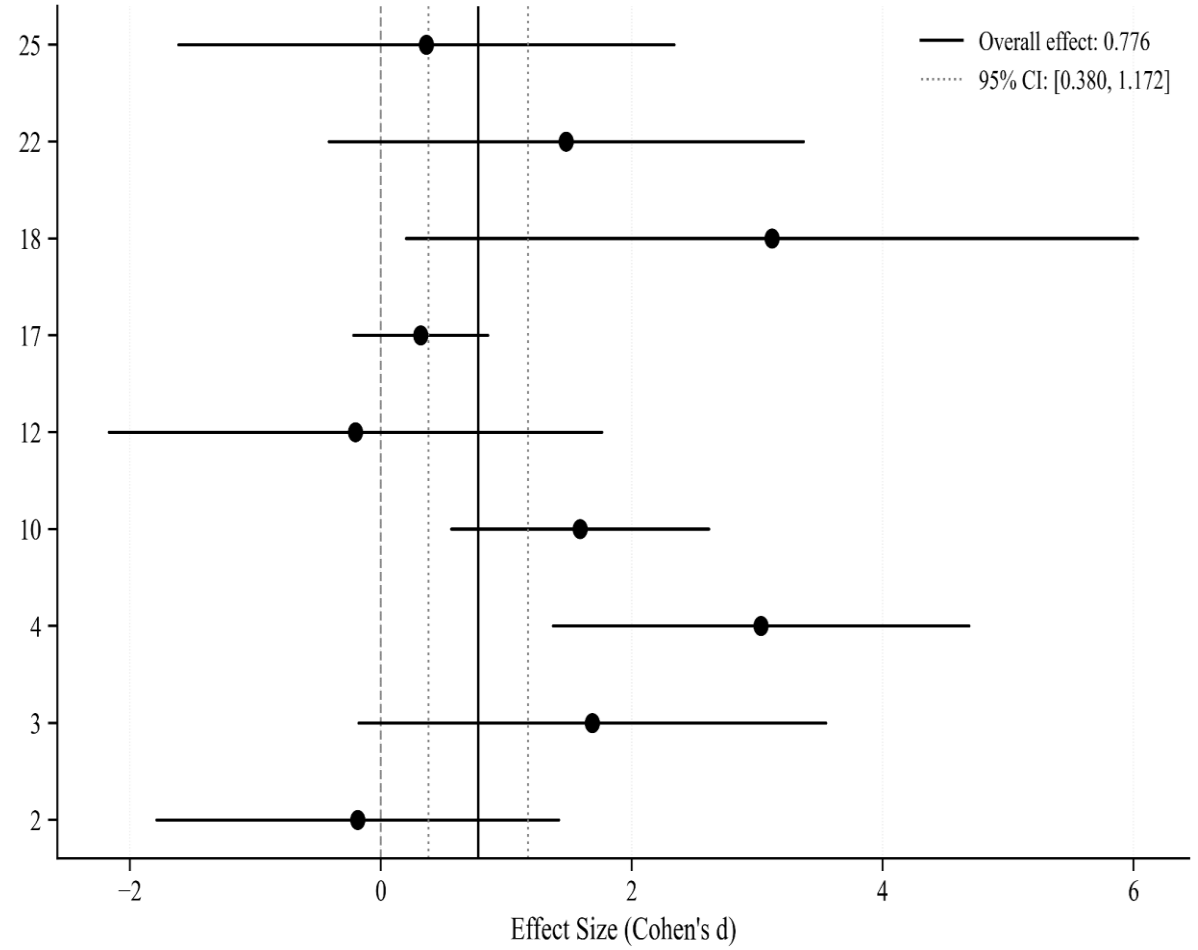
به منظور مقایسه اثربخشی آبیاری قطره‌ای زیرسطحی به تفکیک برعملکرد محصولات زراعی و باغی، فراتحلیل در دو زیرگروه محصولات زراعی و باغی انجام شد و با توجه به مطالعات دردسترس و واجد شرایط فراتحلیل صرفا در مقایسه با آبیاری قطره‌ای سطحی انجام شد (شکل ۴). با توجه به جداول همگنی ارائه شده در این شکل مقادیر آماره Q بیانگر تنوع بیشتر در اثرات آبیاری در محصولات زراعی نسبت به محصولات باغی است. مقادیر I^2 و H^2 بیان‌کننده ناهمگنی بیشتر بین مطالعات در محصولات باغی نسبت به محصولات زراعی در اثر عوامل محیطی است. مقادیر τ^2 نیز بیانگر تفاوت‌های معنادار بین اثرات مختلف در محصولات زراعی و باغی است. مقادیر P-Value بیان‌کننده عدم معنی‌داری غیرهمگنی در گروه‌های مورد بررسی است. با توجه به نمودار جنگلی ارائه شده در شکل (۴) اندازه اثر کلی در مقایسه آبیاری قطره‌ای زیرسطحی نسبت به آبیاری قطره‌ای سطحی برای محصولات زراعی و باغی به ترتیب ۰/۳۳۷ و ۰/۷۷۶ بوده است که بیانگر تأثیر مثبت آبیاری قطره‌ای زیرسطحی بر افزایش عملکرد در هر دو زیرگروه محصولات زراعی و باغی نسبت به روش آبیاری قطره‌ای سطحی است. همچنین تأثیر افزایش عملکرد در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی نسبت به آبیاری قطره‌ای سطحی در هر دو گروه محصولات باغی و زراعی معنی‌دار بوده است و این تأثیر در محصولات باغی بیشتر بوده است. این نتیجه به دلیل عمق بیشتر ریشه و نیاز آبیاری و تغذیه‌ای متفاوت محصولات باغی نسبت به محصولات زراعی است که به طور مؤثرتری با آبیاری قطره‌ای زیرسطحی تأمین می‌شود.

A



Q	P-Value	I^2	H^2	tau^2
29.73	0.34	42.8	1.74	0.31

B

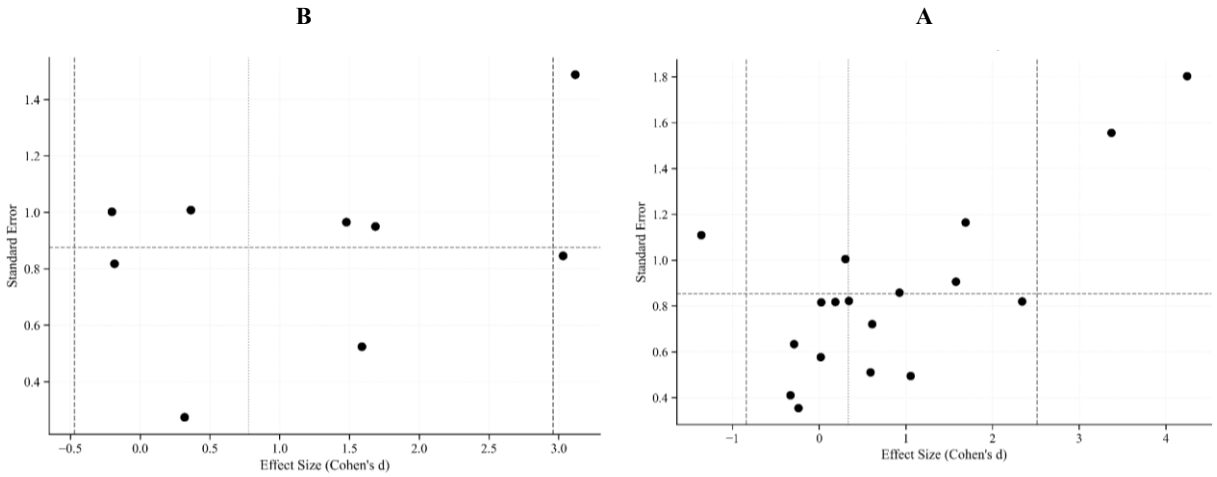


Q	P-Value	I^2	H^2	tau^2
18.71	0.13	57.25	2.33	0.43

Fig. 4- The forest plot and the results of homogeneity analysis for comparing the crop yield of subsurface drip irrigation with surface drip irrigation for agricultural products (18 studies) (A) and horticultural products (9 studies) (B)

شکل ۴- نمودار جنگلی و نتایج آنالیز همگنی مقایسه عملکرد محصول در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی نسبت به آبیاری قطره‌ای سطحی برای محصولات زراعی (۱۸ مطالعه) (A) و محصولات باغی (۹ مطالعه) (B)

به منظور بررسی سوگیری انتشارات، نمودار قیفی و نتایج آزمون Egger در شکل (۵) ارائه شده است. بر اساس این شکل بیشتر مطالعات به سمت اندازه اثر مثبت منحرف شده‌اند. یعنی بیشتر مطالعات اثربخشی آبیاری قطره‌ای زیرسطحی بر افزایش عملکرد را گزارش کرده‌اند. همچنین سوگیری انتشارات نیز وجود داشته است.



Egger P-Value	Egger intercept
2.7E-03	0.81

Egger P-Value	Egger intercept
1.3E-06	1.02

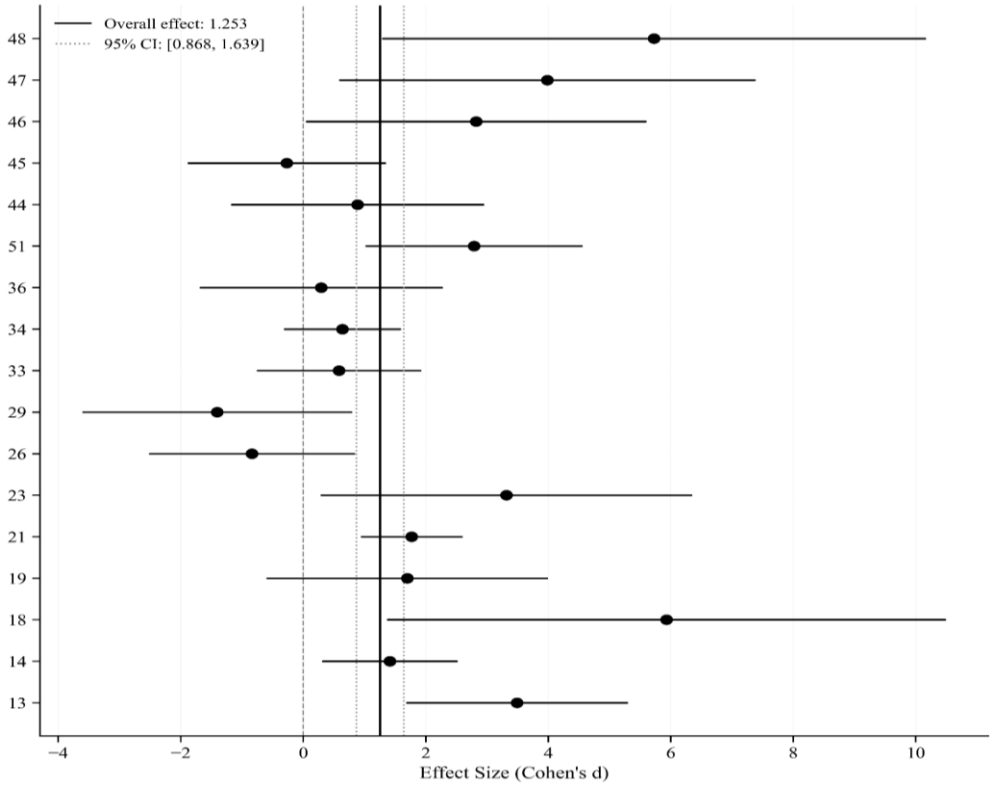
Fig. 5- The funnel plot and the results of Egger analysis for comparing the crop yield of subsurface drip irrigation with surface drip irrigation for Agricultural products (A) and horticultural products (B)

شکل ۵- نمودار قیفی و نتایج آزمون Egger مقایسه عملکرد محصول در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی نسبت به آبیاری قطره‌ای سطحی برای محصولات زراعی (A) و محصولات باغی (B)

۳-۲- بررسی نتایج فراتحلیل در اثربخشی آبیاری قطره‌ای زیرسطحی بر بهره‌وری آب کشاورزی

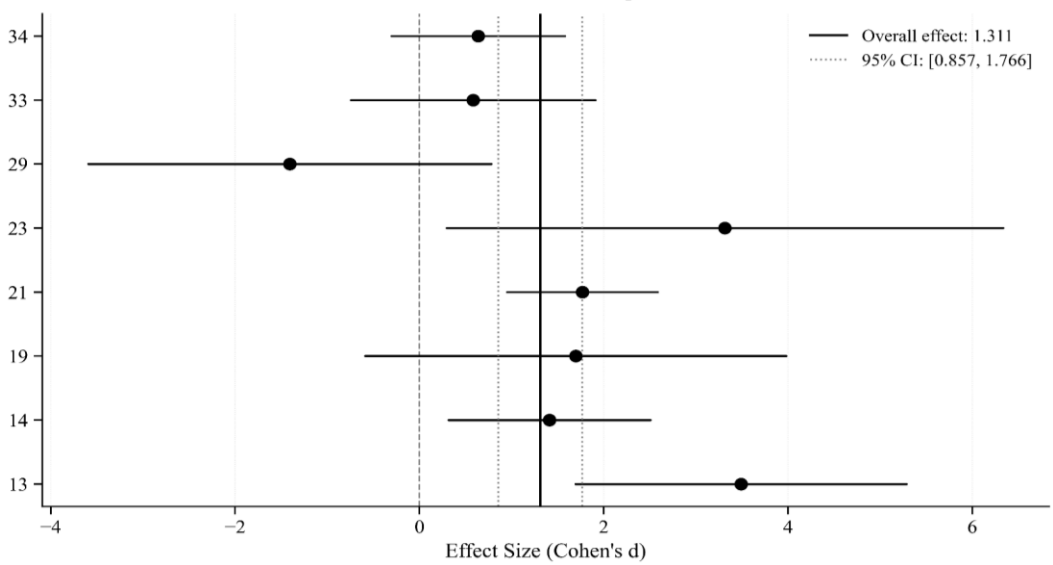
در شکل (۶) نمایی از نمودار جنگلی و آنالیز همگنی مقایسه اثربخشی آبیاری قطره‌ای زیرسطحی بر بهره‌وری آب کشاورزی نسبت به سایر روش‌های آبیاری ارائه شده است. با توجه به شکل (6-A) بررسی آماره‌های همگنی (Q، I^2، H^2 و τ^2) بیانگر غیرهمگنی متوسط بین مطالعات مربوط به مقایسه آبیاری قطره‌ای زیرسطحی با سایر روش‌های آبیاری (شامل قطره‌ای سطحی، آبیاری بارانی و آبیاری سطحی) است. این غیرهمگنی با توجه به مقادیر P-Value ارائه شده معنی‌دار است. این نتایج به دلیل تنوع محصولات و روش‌های آبیاری است. بنابراین فراتحلیل برای روش‌های آبیاری به تفکیک انجام شد که نتایج آنها در شکل‌های (6-B) و (6-C) ارائه شده است. به دلیل محدودیت تعداد مطالعات، امکان بررسی فراتحلیل برای هر محصول وجود نداشت. همچنین به دلیل محدود بودن تعداد مطالعات واجد شرایط فراتحلیل این بررسی برای مقایسه اثربخشی آبیاری قطره‌ای زیرسطحی بر بهره‌وری آب کشاورزی نسبت به آبیاری بارانی انجام نشد. به طور مشابه در مطالعه Yu et al. (2020) غیرهمگنی بین مطالعات فراتحلیل، ناشی از تأثیر عوامل محیطی و سطوح متفاوت کم آبیاری بر عملکرد و کارایی مصرف آب گندم عنوان شده است. همچنین در مطالعه Behdad et al. (2022) نیز غیرهمگنی ناشی از فراتحلیل تأثیر تنش خشکی بر صفات زراعی گندم وجود داشت که دلیل آن سوگیری انتشارات عنوان شده است. بنابراین؛ اگرچه عوامل متعدد فنی، محیطی و حتی نوع محصول از منابع اصلی غیرهمگنی هستند؛ اما به دلیل تعداد محدود مقالات واجد شرایط برای فراتحلیل، امکان انجام فراتحلیل زیرگروهی رسمی برای بررسی هر یک از آن‌ها به صورت انفرادی وجود نداشت.

A



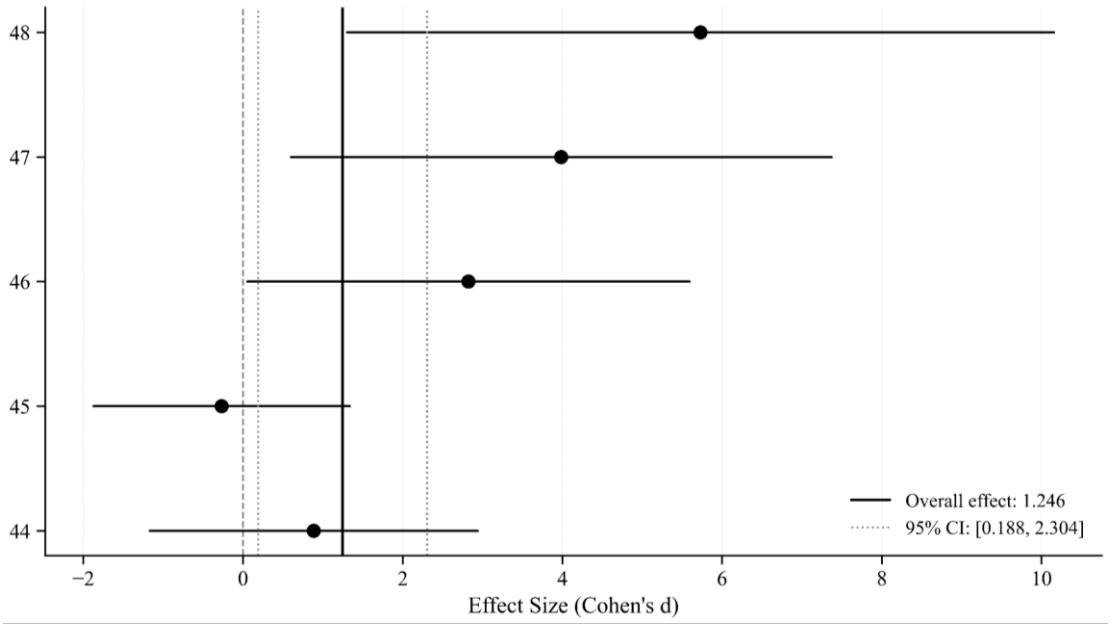
Q	P-Value	I^2	H^2	τ^2
42.94	0.03	62.74	2.68	1.04

B



Q	P-Value	I^2	H^2	τ^2
17.72	0.01	60.51	2.53	0.58

C



Q	P-Value	I^2	H^2	τ^2
11.23	0.3	64.39	2.81	2.10

Fig. 6- The forest plot and the results of homogeneity analysis for comparing the water use productivity of subsurface drip irrigation with other methods of irrigation, A: Other irrigation methods (17 studies), B: Surface drip irrigation (8 studies), C: Surface irrigation (5 studies)

شکل ۶- نمودار جنگلی و نتایج آنالیز همگنی مقایسه بهره‌وری آب کشاورزی در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی نسبت به سایر روش‌های آبیاری (۱۷ مطالعه) (A)، آبیاری قطره‌ای سطحی(۸ مطالعه) (B) و آبیاری سطحی (۵ مطالعه) (C)

با توجه به جداول ارائه شده در شکل (6-B) بررسی اولیه آماره‌های همگنی (Q، I^2، H^2 و τ^2) بیانگر غیرهمگنی قابل توجه بین مطالعات مربوط به مقایسه آبیاری قطره‌ای سطحی و آبیاری قطره‌ای زیرسطحی است (Q=27.8، I^2=67.6، H^2=3 و τ^2=0.93) که ناشی از تنوع محصولات بوده است. برای اثبات این موضوع دو محصول باغی(خرما) از ده محصول مورد بررسی در این بخش از روند فراتحلیل حذف شده و مجددا تحلیل برای محصولات زراعی صورت گرفت که نتایج حاکی از کاهش ناهمگنی بین مطالعات بود، هر چند مقدار P-Value بیانگر معنی‌داری غیرهمگنی است. با توجه به شکل (6-C) بررسی آماره‌های همگنی (Q، I^2، H^2 و τ^2) بیانگر غیرهمگنی متوسط بین مطالعات مربوط به مقایسه آبیاری قطره‌ای زیرسطحی و آبیاری سطحی است. این نتایج ممکن است از دقت پایین مطالعات (به دلیل خطای استاندارد بیشتر از یک) نشئت می‌گیرد، با وجود این، محدود بودن تعداد مطالعات واجد شرایط فراتحلیل در این حوزه، مانع از حذف آن‌ها شد. البته مقادیر P-Value حاکی از عدم معنی‌داری غیرهمگنی است. با توجه به نمودار جنگلی ارائه شده در شکل (۶) اندازه اثر کلی بر بهره‌وری آب کشاورزی در مقایسه آبیاری قطره‌ای زیرسطحی نسبت به سایر روش‌های آبیاری، آبیاری قطره‌ای سطحی و آبیاری سطحی به ترتیب ۱/۲۵، ۱/۳۱ و ۱/۲۵ بوده است که بیانگر قوی بودن اثر آبیاری قطره‌ای زیرسطحی بر افزایش بهره‌وری آب کشاورزی بوده است و فاصله اطمینان ارائه شده نیز حاکی از معنی‌دار بودن این اندازه اثر است. بررسی مطالعات منتخب برای فراتحلیل نشان داد که تغییر بهره‌وری آب کشاورزی در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی نسبت به سایر روش‌های آبیاری بین ۰/۸۹ تا ۳/۹ برابر بوده است. همچنین مقایسه آبیاری قطره‌ای زیرسطحی نسبت به آبیاری قطره‌ای سطحی نشان داد، بهره‌وری آب کشاورزی در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی به میزان ۷ تا ۳۷ درصد افزایش یافته است.

مقایسه آبیاری قطره‌ای زیرسطحی نسبت به آبیاری سطحی در مطالعات منتخب حاکی از این بود که، بهره‌وری آب کشاورزی در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی بین ۱/۱ تا ۴ برابر روش آبیاری سطحی بود. بر اساس نتایج ارائه شده در شکل (۷) نمودار قیفی نشان می‌دهد که بیشتر مطالعات به سمت اندازه اثر مثبت منحرف شده‌اند. به این معنی که بیشتر مطالعات اثربخشی آبیاری قطره‌ای زیرسطحی بر افزایش بهره‌وری آب کشاورزی را نسبت به سایر روش‌های آبیاری نشان می‌دهد. بر اساس آزمون Egger نیز سوگیری انتشارات وجود داشته است که به دلیل محدودیت تعداد مطالعات، عدم گزارش یا عدم انتشار اندازه اثرهای منفی وجود داشته است. لازم به ذکر است که سوگیری انتشارات ارائه شده در این بخش بیانگر غلبه منطقی نتایج مثبت در این حوزه است که تأییدی بر اثرگذاری ذاتی روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی است نه ایراد آماری.

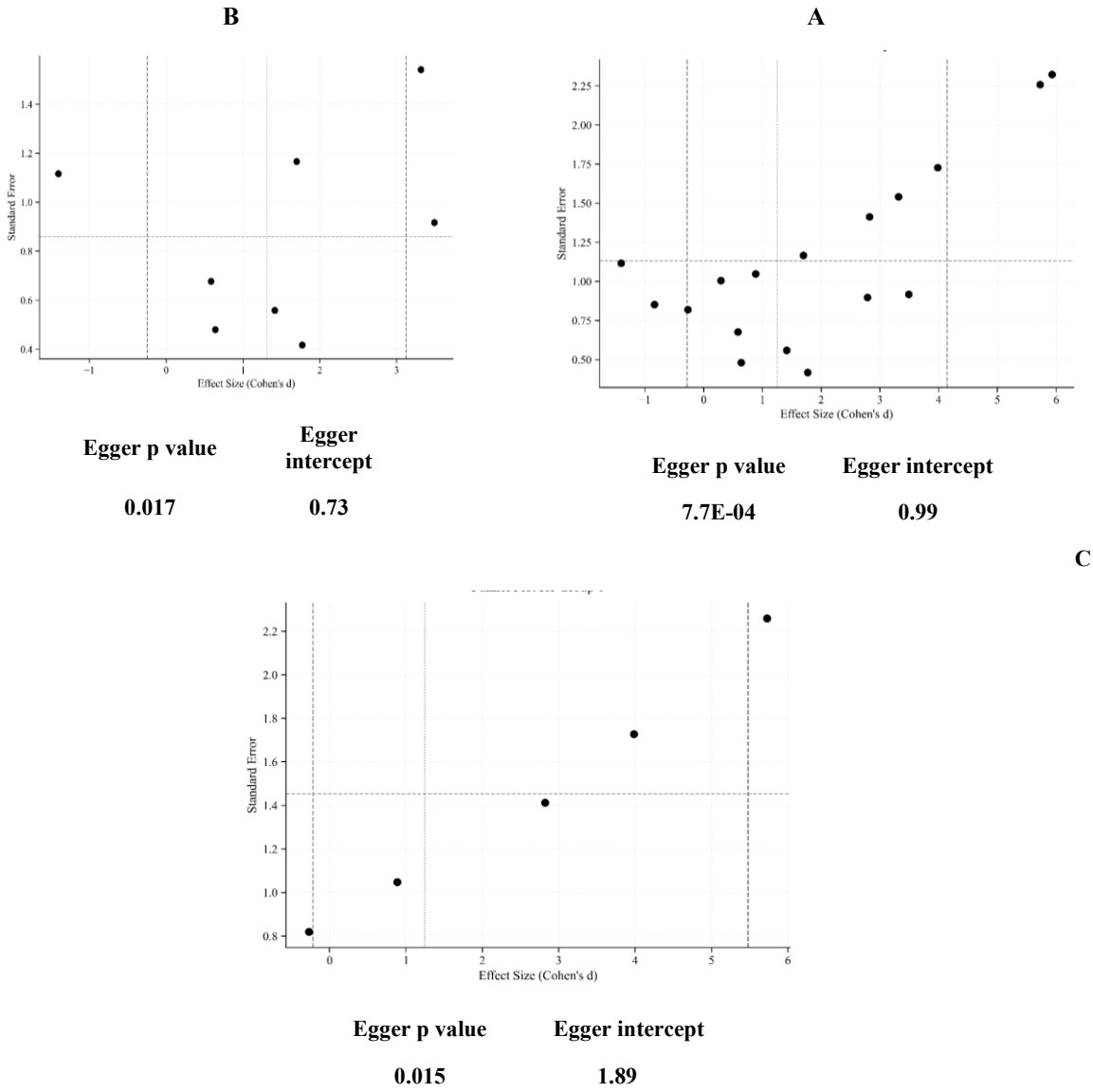
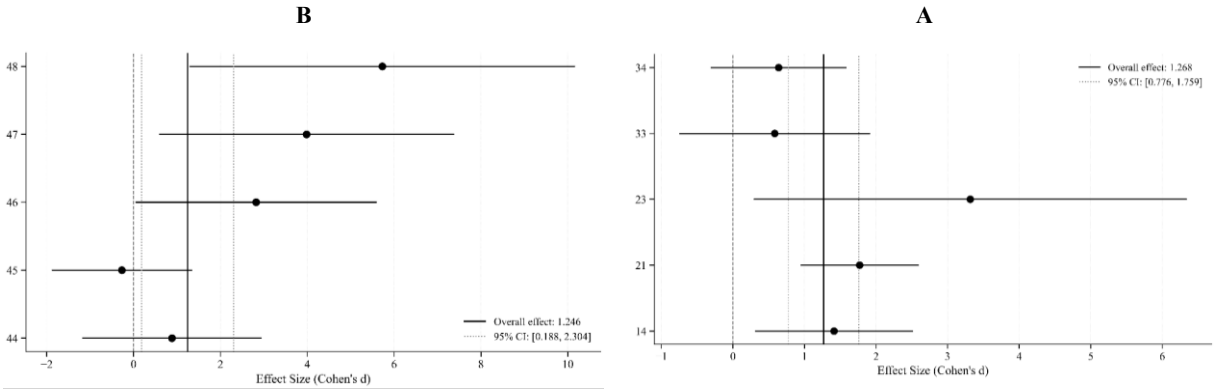


Fig. 7- The funnel plot and the results of Egger analysis for comparing the water use productivity of subsurface drip irrigation with other methods of irrigation, A: Other irrigation methods, B: Surface drip irrigation, C: Surface irrigation

شکل ۷- نمودار قیفی و نتایج آزمون Egger مقایسه بهره‌وری آب کشاورزی در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی نسبت به سایر روش‌های آبیاری (A)، آبیاری قطره‌ای سطحی (B) و آبیاری سطحی (C)

۳-۲-۱- بررسی نتایج فراتحلیل در اثربخشی آبیاری قطره‌ای زیرسطحی بر بهره‌وری آب کشاورزی محصولات زراعی نسبت به آبیاری قطره‌ای سطحی و آبیاری سطحی

با توجه به محدودیت تعداد مطالعات واجد شرایط فراتحلیل امکان بررسی اثربخشی آبیاری قطره‌ای زیرسطحی بر بهره‌وری آب کشاورزی در محصولات باغی وجود نداشت. همچنین در خصوص محصولات زراعی نیز به دلیل محدودیت مطالعات واجد شرایط فراتحلیل امکان مقایسه آبیاری قطره‌ای زیرسطحی و آبیاری بارانی وجود نداشت. بنابراین در این بخش صرفا به بررسی اثربخشی آبیاری قطره‌ای زیرسطحی در خصوص بهره‌وری آب کشاورزی محصولات زراعی نسبت به آبیاری قطره‌ای سطحی و آبیاری سطحی پرداخته شد (شکل ۸).



Q	P-Value	I^2	H^2	τ^2
6.01	0.009	33.53	1.5	0.12

Q	P-Value	I^2	H^2	τ^2
11.2	0.3	64.4	2.8	2.1

Fig. 8- The forest plot and the results of homogeneity analysis for comparing the agricultural water productivity of agricultural products of subsurface drip irrigation with surface drip irrigation (5 studies) (A) and with surface irrigation (5 studies) (B)

شکل ۸- نمودار جنگلی و نتایج آنالیز همگنی مقایسه بهره‌وری آب کشاورزی برای محصولات زراعی بین آبیاری قطره‌ای زیرسطحی نسبت به آبیاری قطره‌ای سطحی (۵ مطالعه) (A) و بین آبیاری قطره‌ای زیرسطحی نسبت به آبیاری سطحی (۵ مطالعه) (B)

با توجه به جداول ارائه شده در شکل (۸) و مقدار آماره Q، اثرات آبیاری قطره‌ای زیرسطحی در مقایسه با آبیاری سطحی، نسبت به آبیاری قطره‌ای سطحی تنوع بیشتری داشته است. به این مفهوم که نتایج مطالعات مقایسه آبیاری قطره‌ای زیرسطحی با آبیاری سطحی در خصوص تأثیر بر بهره‌وری آب محصولات زراعی غیرهمگن‌تر است. مقادیر I^2، H^2 و τ^2 ارائه شده در این جداول نیز بیانگر این است که تنوع و پراکندگی در نتایج حاصل از مقایسه آبیای قطره‌ای زیرسطحی با آبیاری سطحی به مراتب بیشتر از مقایسه آبیاری قطره‌ای زیرسطحی با آبیاری قطره‌ای سطحی است. این تفاوت، ناشی از تفاوت‌های واقعی در روش‌های اجرا و شرایط بومی آبیاری سطحی است و نشان می‌دهد که آبیاری قطره‌ای زیرسطحی در برابر آبیاری سطحی، تأثیرات متنوع‌تری را به نمایش می‌گذارد. توجه به این نکته ضروری است که با توجه به مقادیر P-Value ارائه شده، بررسی همگنی ارائه شده در مقایسه آبیاری قطره‌ای زیرسطحی با آبیاری قطره‌ای سطحی معنی‌دار است ولی بررسی همگنی ارائه شده برای مقایسه آبیاری قطره‌ای زیرسطحی و آبیاری سطحی معنی‌دار نبوده است. همچنین، مقادیر اندازه اثر و فواصل اطمینان ارائه شده در نمودارهای جنگلی ارائه شده در شکل (۸) حاکی از افزایش قوی و معنی‌دار بهره‌وری آب کشاورزی در محصولات زراعی در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی نسبت به آبیاری سطحی و قطره‌ای سطحی است (اندازه اثر ۱/۲۴۶ برای مقایسه آبیاری قطره‌ای زیرسطحی با آبیاری سطحی و ۱/۲۶۸ برای مقایسه آبیاری قطره‌ای زیرسطحی با آبیاری قطره‌ای سطحی).

به منظور بررسی سوگیری انتشارات نمودار قیفی و نتایج آزمون Egger در شکل (۹) ارائه شده است. با توجه به شکل (9-A) در مقایسه آبیاری قطره‌ای زیرسطحی با آبیاری قطره‌ای سطحی در

خصوص بهبود بهره‌وری آب کشاورزی محصولات زراعی هیچ شواهد معنی‌داری مبنی بر سوگیری انتشارات وجود ندارد؛ اما با توجه به شکل (B -9) در مقایسه آبیاری قطره‌ای زیرسطحی با آبیاری سطحی در خصوص بهبود بهره‌وری آب کشاورزی محصولات زراعی سوگیری انتشارات به صورت معنی‌دار وجود داشته است. البته با توجه به خصوصیات ذاتی آبیاری قطره‌ای زیرسطحی در بهبود بهره‌وری آب کشاورزی از طریق کاهش تلفات تبخیر و بهبود وضعیت رطوبت خاک در ناحیه توسعه ریشه این انتظار می‌رود که مطالعات انجام شده در این زمینه بیشتر در زمینه اثرات این روش آبیاری بر بهبود بهره‌وری آب کشاورزی متمرکز باشند. بنابراین این نتیجه بیشتر از اینکه ایرادی آماری تلقی شود، بیان کننده موثرتر بودن این روش آبیاری نسبت به آبیاری سطحی در بهبود بهره‌وری آب کشاورزی در محصولات زراعی است.

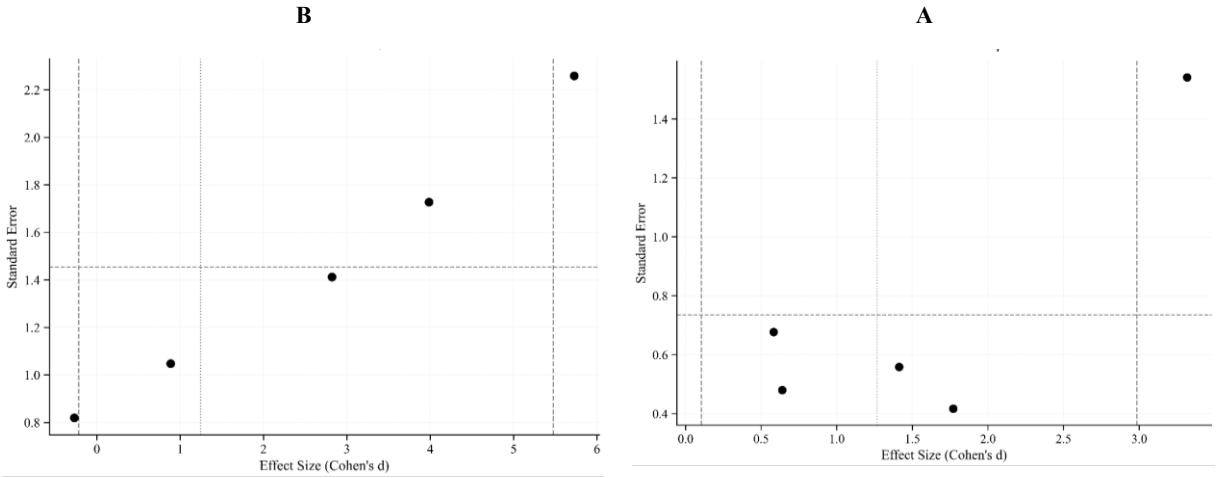


Fig. 9- The funnel plot and the results of Egger analysis for comparing the agricultural water productivity of agricultural products of subsurface drip irrigation with surface drip irrigation (A) and with surface irrigation (B)

شکل ۹- نمودار قیفی و نتایج آزمون Egger مقایسه بهره‌وری آب کشاورزی برای محصولات زراعی بین آبیاری قطره‌ای زیرسطحی نسبت به آبیاری قطره‌ای سطحی (A) و بین آبیاری قطره‌ای زیرسطحی نسبت به آبیاری سطحی (B)

۴-خلاصه و جمع‌بندی

با توجه به پروتکل PRISMA در این مطالعه، ۴۲ مطالعه موجود در بانک اطلاعاتی که واجد شرایط انجام فراتحلیل بودند انتخاب و در ارزیابی اثربخشی آبیاری قطره‌ای زیرسطحی بر بهبود عملکرد محصول و بهره‌وری آب کشاورزی مورد استفاده قرار گرفتند. بر اساس تحلیل حساسیت انجام شده در خصوص مطالعات منتخب، حذف هیچ یک از مطالعات تأثیر معنی‌داری بر اندازه‌اثر نهایی حاصل از فراتحلیل نداشت که این نتیجه پایداری نتایج حاصل در این مطالعه را تأیید می‌کند. با توجه به فراتحلیل انجام شده در این مطالعه، اثربخشی آبیاری قطره‌ای زیرسطحی بر بهبود عملکرد محصول نسبت به سایر روش‌های آبیاری (شامل آبیاری قطره‌ای سطحی، آبیاری بارانی و آبیاری سطحی) متوسط و اندازه اثر به دست آمده مثبت برآورد شد (۰/۵) که از نظر آماری نیز معنی‌دار بوده است. همچنین اثربخشی آبیاری قطره‌ای زیرسطحی بر بهبود بهره‌وری آب کشاورزی نیز مثبت و اندازه اثر قوی برآورد شد (۱/۲۵۳).

در خصوص مقایسه آبیاری قطره‌ای زیرسطحی با آبیاری قطره‌ای سطحی اندازه اثر برآورد شده در بررسی عملکرد محصول مثبت و معنی‌دار بود(۰/۵). همچنین اندازه اثر برآورد شده در مقایسه آبیاری قطره‌ای زیرسطحی با آبیاری قطره‌ای سطحی در خصوص بهبود بهره‌وری آب کشاورزی نیز قوی و معنی‌دار بوده است (۱/۳۱). مقایسه آبیاری قطره‌ای زیرسطحی با آبیاری سطحی نشان داد که اندازه اثر به دست آمده در خصوص عملکرد محصول مثبت، کم و غیرمعنی‌دار برآورد شده است (۰/۲۹۸). ولی در خصوص بهره‌وری آب کشاورزی این اندازه اثر مثبت، قوی و معنی‌دار بوده است (۱/۲۵).

در خصوص مقایسه آبیاری قطره‌ای زیرسطحی با آبیاری بارانی اندازه اثر به دست آمده در خصوص عملکرد محصول مثبت، قوی و معنی‌دار بوده است (۰/۶۴۶). تأثیر افزایش عملکرد در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی نسبت به آبیاری قطره‌ای سطحی در هر دو گروه محصولات باغی و زراعی معنی‌دار بوده است و این تأثیر در محصولات باغی بیشتر بوده است(اندازه اثر در محصولات زراعی ۰/۳۳۷ و در محصولات باغی ۰/۷۷۶). این نتیجه به دلیل عمق بیشتر ریشه و نیاز آبیاری و تغذیه‌ای متفاوت محصولات باغی نسبت به محصولات زراعی است که به طور مؤثرتری با آبیاری قطره‌ای زیرسطحی تأمین می‌شود. مقایسه اثربخشی آبیاری قطره‌ای زیرسطحی با آبیاری سطحی و آبیاری قطره‌ای سطحی در خصوص بهبود بهره‌وری آب کشاورزی نیز حاکی از افزایش قوی و معنی‌دار بهره‌وری آب کشاورزی در محصولات زراعی در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی نسبت به آبیاری سطحی و قطره‌ای سطحی است (اندازه اثر ۱/۲۴۶ برای مقایسه با آبیاری سطحی و ۱/۲۶۸ برای مقایسه با آبیاری قطره‌ای سطحی).

غیرهمگنی بین مطالعات انتخاب شده در فراتحلیل بررسی عملکرد محصول از نظر آماری معنی‌دار نبود. همچنین با تفکیک محصولات به صورت زراعی و باغی نیز نتایج همگنی مشاهده شده از نظر آماری معنی‌دار نبود. همچنین غیرهمگنی مشاهده شده در مقایسه بهره‌وری آب کشاورزی در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی برای کلیه محصولات زراعی و باغی نسبت به آبیاری سطحی معنی‌دار نبود ولی نسبت به سایر روش‌های آبیاری و آبیاری قطره‌ای سطحی معنی‌دار بود. نتایج مشابه در مقایسه بهره‌وری آب کشاورزی در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی برای صرفا محصولات زراعی نسبت به آبیاری سطحی و قطره‌ای زیرسطحی مشاهده شد. همچنین، در مطالعه فراتحلیل حاضر، سوگیری انتشارات مشهود است که به دلیل محدود بودن تعداد مطالعات واجد شرایط فراتحلیل و یا تمایل به گزارش و انتشار نتایج مثبت نشئت می‌گیرد. البته با توجه به خصوصیات ذاتی آبیاری قطره‌ای زیرسطحی در بهبود عملکرد و به ویژه بهره‌وری آب کشاورزی از طریق کاهش تلفات تبخیر و بهبود وضعیت رطوبت خاک در ناحیه توسعه ریشه این انتظار می‌رود که مطالعات انجام شده در این زمینه بیشتر در زمینه اثرات مثبت این روش آبیاری متمرکز باشند. بنابراین این نتیجه بیشتر از اینکه یک ایراد آماری تلقی شود، بیان کننده موثرتر بودن این روش آبیاری در بهبود عملکرد و بهره‌وری آب کشاورزی است.

به طور کلی بر اساس نتایج این مطالعه، آبیاری قطره‌ای زیرسطحی منجر به افزایش عملکرد و بهره‌وری آب کشاورزی نسبت به سایر روش‌های آبیاری خواهد شد. هر چند افزایش عملکرد نسبت به آبیاری بارانی و سطحی مطابق با نتایج فراتحلیل در این مطالعه معنی‌دار نبوده است. وجود غیرهمگنی بیانگر تأثیر عوامل مدیریتی و فنی بر عملکرد سیستم‌های آبیاری قطره‌ای زیرسطحی است که بیانگر این مطلب است که اثربخشی این روش‌ها نیازمند اجرای درست مطابق با شرایط گیاه و خاک در منطقه موردنظر است. همچنین به منظور ارائه تحلیل جامع و قوی در خصوص برتری آبیاری قطره‌ای زیرسطحی نسبت به سایر روش‌های آبیاری، انجام فراتحلیل‌های مکمل در خصوص مسائل فنی، محیطی (مانند تأثیر خاک بر روند اثربخشی آبیاری قطره‌ای زیرسطحی) اجتماعی و اقتصادی در آینده پیشنهاد می‌شود.

پی‌نوشت‌ها

1- Subsurface Irrigation
2- Drip Irrigation
3- Sprinkler Irrigation
4- Surface Irrigation
5- Yield
6- Agricultural Water Productivity
7- Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses
8- Identification
9- Eligibility
10- Included
11- Effect Size
12- Standard Error
13- Confidence Interval
14- Cohen's Effect Size Index
15- Forest Plot
16- Funnel Plot

۵- منابع

Abou Seeda MA, Hammad SA, Yassen AA, Abou El-Nour EA (2020) Evaluation and optimization of subsurface irrigation (SDI) system: A review. Middle East Journal of Applied Science 10(3):508-534

Ahmed TF, Hashmi HN, Ghumman AR, Seihkh AA, Afzal MA (2017) Influence of surface and sub-surface drip irrigation methods on performance and yields of two tomato varieties. Academia Journal of Scientific Research 5(9):196-202

Ahmed TF, Hashmi HN, Ghumman AR, Sheikh AA (2012) Performance assessment of surface and subsurface drip irrigation system for date palm fruit trees. African Journal of Agricultural Research 7(10):1542-1549

Akbari Zardkhane S, Atari M (2016) Necessity of measuring and reporting effect size measures in psychological studies. Rooyesh 5(1):29-46

Alam M, Trooien TP, Dumler TJ, Rogers DH (2002) Using subsurface drip irrigation for alfalfa. Journal of the American Water Resources Association 38(6):1715-1721

Atamaleki A, Naimi N, Fakhri Y, Sharifi Maleksari H, Nosrati H, Fallah S (2020) Investigation of heavy metals in mint plants irrigated by wastewater: A systematic review and meta-analysis. Iranian Journal of Health and Environment 12(4):679-694 (In Persian)

Aydinsakir K, Dinc N, Buyuktas D, Kocaturk M, Ozkan CF, Karaca C (2021) Water productivity of soybeans under regulated surface and subsurface drip irrigation conditions. Irrigation Science 39(6):773–787

Al-Ghobari HM, Dewidar AZ (2018) Integrating deficit irrigation into surface and subsurface drip irrigation as a strategy to save water in arid regions. Agricultural Water Management 209:55-61

Bastani Sh (2018) A historical review of innovations and developments of subsurface irrigation systems. Journal of Water and Sustainable Development 4(2):69-80 (In Persian)

Behdad M, Paknejad F, Mahdavi Damghani AM, Vazan S, Moarrefi M (2022) Effects of drought stress on agronomical traits of wheat (Triticum aestivum L.): A meta-analysis. Environmental Stresses crop science 15(1):53-65

Bryla DR, Trout TJ, Ayras JE, Johnson RS (2003) Growth and production of young peach trees irrigated by furrow, microjet, surface drip, or subsurface drip systems. HortScience 38(6):1112-1116

Bryla DR, Jhonson RS, Crisosto CH, Trout TJ (2005) Influence of irrigation method and scheduling on patterns of soil and tree water status and its relation to yield and fruit quality in peach. HortScience 40(7):2118-2124

Bordovsky JP, Porter D (2003) Cotton response to pre-plant irrigation level and irrigation capacity using spray, lepa, and subsurface drip irrigation. ASAE Annual International Meeting Sponsored by ASAE, 27- 30 July, United States, Las Vegas

Cao Y, Cai H, Sun S, Gu X, Mu Q, Duan W, Zhao Z (2022) Effects of drip irrigation methods on yield and water productivity of maize in Northwest China. Agricultural water management 259:107227

Cheng M, Wang H, Fan J, Zhang S, Liao Z, Zhang F, Wang Y (2021) A global meta-analysis of yield and water use efficiency of crops, vegetables and fruits under full, deficit and alternate partial root-zone irrigation. Agricultural Water Management 248:106771

Delbaz R, Ebrahimian H, Abbasi F, Nazi Ghameshlou A (2021) Meta-Analysis of Surface and Drip Fertigation Effectiveness on Crop Yield, Fertilizer, and Water Productivity. Journal of Water Research in Agriculture (Soil and Water Science) 35(2):139-149 (In Persian)

Devasirvatham V (2009) A Review of Subsurface Drip Irrigation in Vegetable Production CRC for Irrigation Futures. Journal of Irrigation Matters (3):1-44

Dogan E, Kirnak H, Berekatoglu K, Bilgel L, Surucu A (2008) Water stress imposed on muskmelon (Cucumis Melo L.) with subsurface and surface drip irrigation systems under semi-arid climatic conditions. Irrigation Science 26(2):131-138

Egger M, Davey Smith G, Schneider M (1997) Bias in meta-analysis detected by a simple, graphical test. British Medical Journal 315(7109):629-634

Enciso J, Jifon J, Anciso J, Ribera L (2015) Productivity of onions using subsurface drip irrigation versus furrow irrigation systems with an internet based irrigation scheduling program. International Journal of Agronomy 178180:1–6

Esmail GEA, Merwad MA, Mostafa AM, Saleh MMS (2016) The beneficial effect of subsurface drip irrigation system on yield, fruit quality and leaf mineral content of Valencia orange trees. International Journal of ChemTech Research 9(8):70-76

Fan W, Li G (2018) Effect of soil properties on hydraulic characteristics under subsurface drip irrigation. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 121(5):052042

Fu B, Li Z, Gao X, Wu L, Lan J, Peng W (2021) Effects of subsurface drip irrigation on alfalfa (Medicago sativa L.) growth and soil microbial community structures in arid and semi-arid areas of northern China. Applied Soil Ecology 159:103859

Gavaghan DJ, Moore RA, McQuay H.J (2000) An evaluation of homogeneity tests in meta-analyses in pain using simulations of individual patient data. Pain 85(3):15-424

Ghadami Firouzabadi A (2023) Investigation and selection of suitable wheat irrigation system with meta-analysis method. Iranian Journal of Irrigation and Drainage 2(17):291-303 (In Persian)

Grabow GL, Huffman RL, Evans RO, Jordan DL, Nuti RC (2006) Water distribution from a subsurface drip irrigation system and drainage effect on cotton yield and water use efficiency in a coastal plain soil. Transactions of ASBE, 49(6):1823-1835

Guo J, Zheng LJ, Ma J, Li X, Chen R (2023) Meta-analysis of the effect of subsurface irrigation on Crop yield and water productivity. Sustainability 15(22):15716

Hedges LV, Gurevitch J, Curtis PS (1999) The meta-analysis of response ratios in experimental ecology. Ecology 80(4):1150-1156

Higgins JPT, Thompson SG (2002) Quantifying heterogeneity in a meta-analysis. Statistics in Medicine 21(11):1539-1558

Hutmacher R, Phene CR, Mead RM, Shouse P, Clark D, Vail SS, Swain R, Peters MS, Hawk CA, Kershaw D, Donovan T, Jobes J, Fargerlund J (1992) Subsurface drip of Alfalafa in imperial valler, proceeding of the 22nd California Arizona alfalfa symposium, UAS

Jolaini M, Gangimoghadam E (2016) effect of surface and subsurface drip irrigation methods and different water levels on vegetable characteristics, yield and water use efficiency in Peach cultivars. Iranian Journal of Irrigation and Drainage 2(10):262-271 (In Persian)

Kong Q, Li G, Wang Y, Huo H (2012) Bell pepper response to surface and subsurface drip irrigation under different fertigation levels. Irrigation Science 30(3):233-245

Lamm FR, Trooien TP (2003) Subsurface drip irrigation for corn production: a review of 10 years of research in Kansas. Irrigation Science 22:195-200

Lamm FR (2016) Cotton, Corn and onion production with subsurface drip irrigation: A review. Transactions of the ASABE 59(1):263-278

Liaghat A, Pourgholam-Amiji M, Mashhouri-Nejad P (2018) The effect of surface and subsurface irrigation with saline water and mulch on Corn yield, water productivity and solute distribution in the soil. Journal of Water and Science 32(4):661-674 (In Persian)

Lotfifar O, Mottaghi S (2021) Investigation of the effect of irrigation interruption at different stages of development on yield and yield components of rapeseed using meta-analysis. Journal of Crop Improvement 24(1):159-171 (In Persian)

Mali SS, Jha BK, Singh R, Meena M (2017) Bitter gourd response to surface and subsurface drip irrigation under different fertigation levels. Irrigation and Drainage 66(4):615-625

Mattar MA, Zin-El-Abedin TK, Al-Ghobadi HM, Alazba AA, Elansary HO (2021) Effects of different surface and subsurface drip irrigation levels on growth traits, tuber yield, and irrigation water use efficiency of potato crop. Irrigation Science 39(4):517–533

Meng L, Jennifer ES, Deirdre GL, Patricia L, Angela K, Megan BM, Kate MS, Amelie CMG (2020) Impact of irrigation strategies on tomato plant root distribution and rhizosphere processes in an organic system. Plant Science 11(360):1-12

Meshram DT, Srivastava AK, Thirugnanavel A, Meshram, NM, Jagannadham PTK, Utkhede AD, Pangul CS (2025) Agronomic response of subsurface versus surface drip irrigation in Nagpur mandarin (Citrus reticulata Blanco) on Indian Vertisol. Frontiers in Horticulture 4:1-14

Meshram DT, Srivastava AK, Thirugnanavel A, Meshram NM, Jagannadham PTK, Utkhede AD, Pangul CS (2025) Agronomic response of subsurface versus surface drip irrigation in Nagpur mandarin (Citrus reticulata Blanco) on Indian Vertisol. Frontiers in Horticulture 4:1552283

Mohammad N. El-Nesr NM, Alazba AA, Simunek J (2014) HYDRUS simulations of the effects of dual-drip subsurface irrigation and a physical barrier on water movement and solute transport in soils. Irrigation Science 32(2):111–125

Mohammed MEA, Alhajhoj MR, Ali-Dinar HMA, Munir M (2020) Impact of a novel water-saving subsurface irrigation system on water

productivity, photosynthetic characteristics, yield, and fruit quality of date palm under arid conditions. Agronomy 10(9):1265

Mohammadkhani A, Pourgholam-Amiji M, Sohrabi T, Liaghat A (2020) the effect of different levels of water stress in two surface and subsurface drip irrigation systems on yield and water productivity of Maize. Journal of Water and Irrigation Management 1(2):247-267 (In Persian)

Mohammadi Mohammad Abadi A, Abdolahi Ezzat Abadi M (2016) Introducing the method of subsurface irrigation with cement pipes in pistachio orchards. Agricultural Research, Education and Extension Organization,

Page MJ, McKenzie JE, Bossuyt PM, Boutron I, et al. (2021) The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. BMJ 372

Patel N, Rajput TBS (2009) Effect of subsurface drip irrigation on onion yield. Irrigation Science 27(2):97-108

Patra K, Parihar CM, Nayak HS, Rana B, Singh VK, Krishnan P, Pandey R, Mandal BN, Rathi N, Meena BR, Singh LK, Sidhu HS, Jat ML (2021) Crop performance and nitrogen use-efficiency in maize under conservation agriculture coupled with sub-surface drip fertigation. Indian Journal of Agricultural Sciences 91(3):474-479

Patra K, Parihar CM, Nayak HS, Rana B, Singh VK, Jat SL, Panwar S, Parihar MD, Singh LK, Sidhu HS, Gerard B, Jat ML (2021) Water budgeting in conservation agriculture-based sub-surface drip irrigation in tropical maize using HYDRUS-2D in South Asia. Scientific Reports 11(1):16770

Pejic B, Mackic K, Randjelovic P, Valtner I, Gvozdanovic-Varga J, Bezdan A (2018) Effects of surface and subsurface drip irrigation on the yield, vegetative growth and water productivity of onions. Contemporary Agriculture 67(2):149-156

Pisciotta A, Lorenzo RD, Santalucia G, Barbagallo MG (2018) Response of grapevine (Cabernet Sauvignon cv) to above ground and subsurface drip irrigation under arid conditions. Agricultural Water Management 197:122-131

Robles JM, Botia P, Perez-Perez JG (2016) Subsurface drip irrigation affects trunk diameter fluctuations in lemon trees, in comparison with surface drip irrigation, Agricultural Water Management 165:11-21

Schmidt JE, Peterson C, Wang D, Scow KM, Gaudin ACM 2018. Agroecosystem tradeoffs associated with conversion to subsurface drip irrigation in organic systems. Agricultural Water Management 202:1-8

Selim EM, Mosa AA, El-ghamry AM (2009) Evaluation of humic substances fertigation through surface and subsurface drip irrigation systems on potato grown under Egyptian sandy soil conditions. Agricultural Water Management 96(8):1218–1222

Shrestha A, Mitchell JP, Lanini WT (2007) Subsurface drip irrigation as a weed management tool for conventional and conservation tillage tomato (Lycopersicon esculentum Mill). Research, Review, Practices, Policy and Technology 31(2):91-112

Sheini Dashtegol A,Naseri A, Boroomand Nasab S (2020) Effects of subsurface drip irrigation and furrow irrigation management on growth variables and root distribution in sugarcane cultivation. Iranian Journal of Irrigation and Drainage 14(2):535-547 (In Persian)

Singh DK, Rajput TBS (2007) Response of lateral placement depths of subsurface drip irrigation on okra (Abelmoschus esculentus). International Journal of Plant Production 1(1):73-84

Soliman ALE, Morad MM, Wasfy KI, Moursy MAM (2020) Utilization of aquaculture drainage for enhancing onion crop yield under surface and subsurface drip irrigation systems. Agricultural Water Management 239:106244

Soltani E, Soltani A (2014) Necessity of using meta-analysis in field crops researches. Journal of Crop Production 7(3):203-216 (In Persian)

Song I, Stine S, Pimentel J, Choi CY, Gerba C (2003) The role of irrigation and wastewater: comparison of subsurface drip irrigation and furrow irrigation. 2003 ASAE Annual Meeting, Paper No. 032373, Las Vegas, Nevada, USA, 27–30 July 2003

Stone KC, Bauer PJ, Busscher WJ, Millen JA (2008) Narrow corn production with subsurface drip irrigation. American Society of Agricultural and Biological Engineers, Applied Engineering in Agriculture 24(4):455-464

Sun SM, Yang PL, An QX, Xu v, Yao BL, Li FY, Zhang XX (2016) Investigation into surface and subsurface drip irrigation for jujube trees grown in saline soil under extremely arid climate. European Journal of Horticultural Science 81(3):165–174

Yu L, Zhao X, Gao X, Siddique KHM (2020) Improving/maintaining water-use efficiency and yield of wheat by deficit irrigation: A global meta-analysis. Agricultural Water Management 228:105906

Valentín F, Nortes PA, Domínguez A, Sánchez JM, Intrigliolo DS, Alarcón J J, López-Urrea R (2020) Comparing evapotranspiration and yield performance of maize under sprinkler, superficial and subsurface drip irrigation in a semi-arid environment. Irrigation Science 38(1):105-115

Vadar HR, Pandya PA, Patel RJ (2019) Effect of subsurface drip irrigation depth scheduling in summer Okra. Emergent Life Sciences Research 5(2):52-6

Wang D, Li G, Mo Y, Zhang D, Xu X, Wilkerson CJ, Hoogenboom G (2020) Evaluation of subsurface, mulched and non-mulched surface drip irrigation for maize production and economic benefits in northeast China. Irrigation Science 39(2):159–171

Wang Y, Xu C, Gu Q, Shi Y, Chen J, Wu H, He J, Li X, Han L and Su D (2024) Partial root-zone drying subsurface drip irrigation increased the alfalfa quality yield but decreased the alfalfa quality content. Frontiers in Plant Science 15:1297468

Zhang H, Wang D, Ayars JE, Phene CJ (2017) Biophysical response of young pomegranate trees to surface and sub-surface drip irrigation and deficit irrigation. Irrigation Science 35:425–435