مجله علوم و فنون باغبانی ایران جلد ۲۰ شماره ۴ صفحه‌های ۴۶۷ تا ۴۷۶ (۱۳۹۸)
مقاله پژوهشی

ارزیابی روش تعادل توده‌ای در تعیین غلظت عنصرهای غذایی محلول جایگزین در سیستم بسته کشت هیدروپونیک خیار گلخانه‌ای[1]

Evaluation of Mass Balance Method to Determine Nutrients Concentration of Substitutional Solution in Soilless Closed Hydroponic System of Greenhouse Cucumber

محمد سعید تدین[2]

چکیده

در ایران به‌دلیل کمبود منابع آبی کاربرد سامانه‌های آبکشت بسته در اولویت‌های پژوهشی گسترش کشت گلخانه‌ها قرار دارد. در این شرایط، به‌دلیل هزینه اقتصادی زیاد و دشواری‌های زیست‌محیطی، نیاز شدیدی به بازیافت و استفاده دوباره از محلول‌های غذایی وجود دارد. جایگزینی محلول پایه به‌صورت ثابت در هر مرحله رشد موجب عدم تعادل تغذیه‌ای در آبکشت بسته می‌شود. در این آزمایش این فن، برای تعیین مناسب‌ترین غلظت عنصرهای محلول جایگزین در سامانه بازچرخانی کشت بدون خاک خیار گلخانه‌ای مورد ارزیابی قرار گرفت. آزمایش به‌صورت طرح به‌طورکامل تصادفی با سه تکرار و چهار تیمار کاربرد محلول پایه به‌صورت ثابت (شاهد) و کاربرد محلول پایه و جایگزینی محلول غذایی تنظیم شده در مراحل مختلف رشد با فرض نسبت وزن خشک (کیلوگرم) به مقدار تعرق در سه سطح (لیتر) ۱/۲۰۰، ۱/۳۰۰ و ۱/۴۰۰ با کارایی مصرف آب بالا، متوسط و ضعیف انجام شد. تیمار محلول جایگزین نسبت وزن خشک به تعرق ۱/۳۰۰ موجب بهبود مقدار غلظت عنصرهای غذایی برگ خیار گلخانه‌ای شد و بیشترین مقدار عملکرد در واحد بوته و مقدار فتوسنتز خالص را به خود اختصاص داد. بیشترین کارایی مصرف آب فتوسنتزی مربوط به تیمار محلول جایگزین نسبت وزن خشک به تعرق ۱/۲۰۰ بود.

واژه‌های کلیدی: تغذیه، عملکرد، محلول غذایی گلخانه، نیاز آبی لحظه‌ای.

مقدمه

خیار از گیاهان یکساله جالیزی با نام علمی *Cucumis sativus*، از تیره کدوئیان (Cucurbitaceae) و از جنس *Cucurbita* می‌باشد. ارقام بکرزا دارای برگ‌های بزرگ، پنجه‌ای شکل و به رنگ سبز روشن و بریدگی‌های کم عمق می‌باشند. از نظر تولید گلخانه‌ای در ایران، خیار در رتبه دوم بعد از گوجه‌فرنگی قرار دارد. کشت و تولید انواع سبزی و گل در گلخانه در جهان به سرعت رو به افزایش است. در حال حاضر آبکشت در سراسر دنیا به‌دلیل مدیریت و کارایی بالاتر منابع و عملکرد و کیفیت بالاتر محصول رو به گسترش می‌باشد. کاربرد صنعتی آبکشت برای پرورش گیاهان زینتی، میوه‌ها، سبزی و صیفی گسترش یافته است (۱۲). با توجه به این که ایران در منطقه خشک و نیمه‌خشک اقلیمی جهان قرار دارد و کمبود منابع آبی و تنش‌های محیطی رو به گسترش است، توسعه گلخانه‌ها یک انتخاب نیست بلکه یک ضرورت است. سامانه جریان نازک محلول غذایی[3] یکی از متداول‌ترین روش‌ها برای توسعه گلخانه‌های آبکشت بسته خیار گلخانه‌ای می‌باشد (۲۱). کاربرد این سامانه موجب کاهش مصرف آب به مقدار ۷۰ تا ۹۰٪ و افزایش کارایی مصرف آب بین ۱۰ تا ۱۲ برابر نسبت به کشت در فضای باز می‌گردد (۲۱). هم‌چنین امکان کنترل

۱- تاریخ دریافت: ۹۸/۴/۲۱ تاریخ پذیرش: ۹۸/۹/۱۱

۲- دانشیار بخش تحقیقات خاک و آب مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس، موسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی.

* نویسنده مسئول، پست الکترونیک: (m.tadayon@areeo.ac.ir).

۳- Nutrient Film Technique

[Downloaded from journal-irshs.ir on 2026-10-31]

[DOR: 20.1001.1.16807154.1398.20.4.11.4]

بهینه عوامل محیطی متعدد از جمله نور، دما، رطوبت، عنصرهای غذایی و گازها با توجه به نیاز فیزیولوژیکی گیاه در گلخانه وجود داشته که موجب بهینه شدن رشد گیاه در گلخانه می‌گردد (۱۳). افزون بر این کاهش مدت زمان تولید محصول، امکان تولید در تمام طول سال، کاهش آفت و بیماری‌ها و نبود علف‌های هرز از جمله سودمندی‌های سیستم‌های آبکشت بسته می‌باشد (۱۳). پاسخ گیاهی در سامانه‌های آبکشت به تغییرهای غلظت عنصرهای غذایی شدیدتر و گسترده‌تر از خاک می‌باشد (۱۶). فرمول‌های غذایی متعددی برای سیستم‌های آبکشت وجود دارد و برای رشد گیاهان در آبکشت باید مقدار عنصرهای مختلف در یک دامنه مشخص تعیین شوند که این کار نیاز به آزمایش و تنظیم محلول غذایی دارد. محلول‌های غذایی فرموله شده برای بسیاری از سبزی‌ها و گل‌ها در گلخانه‌ها دارای حاشیه خطای گسترده بوده، تا از کمبود عنصرهای غذایی در محصول‌ها جلوگیری شود. این مسئله باعث کاهش کارایی مصرف عنصرهای غذایی و هدررفتن آن‌ها می‌شود. در این شرایط کاهش غلظت محلول غذایی تا ۵۰٪ نیز موجب بهبود و افزایش کارایی جذب عنصرهای غذایی می‌گردد. بر این اساس نتیجه‌ها نشان داده است که غلظت پایین‌تر محلول غذایی توصیه شده در گلخانه‌ها از کارایی بالاتری برخوردار بوده و موجب بهبود کارایی جذب عنصرهای غذایی می‌گردد (۱۳). در سامانه بازچرخانی کشت بدون خاک، یکی از دشواری‌های کاربرد محلول‌های ثابت و پایش غلظت عنصرها در محلول غذایی، ایجاد عدم تعادل تغذیه‌ای به‌دلیل سرعت متفاوت جذب عنصرها از محلول غذایی می‌باشد (۲ و ۵). غلظت‌های پایین عنصرهای غذایی در محلول حتی با روش‌های دقیق مانند اندازه‌گیری طیف سنجی انتشار اتمی پلاسمایی[۱] به سختی پایش و کنترل می‌شود و خطا مشاهده می‌گردد. از سوی دیگر پایش هدایت الکتریکی محلول غذایی نیز به‌دلیل مقدار متفاوت جذب عنصرهای غذایی و باقی ماندن مقادیر بیشتر کلسیم، منیزیم و سولفات صحیح نمی باشد و عنصرهای کم مصرف نقش بسیار کمی (۰/۱٪) در هدایت الکتریکی محلول غذایی دارند. کلسیم به‌طور غیر فعال جذب گیاه می‌شود و انتقال دوباره آن در آوند آبکش به‌کندی اتفاق می‌افتد. مشاهده شده است که انباشت کلسیم تا ۲۰ میلی‌مول (که ۱۰ برابر بیشتر از غلظت آن در محلول هوگلند می‌باشد) اتفاق می‌افتد و در این شرایط محلول‌پاشی کلسیم توصیه می‌شود (۵). از سوی دیگر pH توصیه شده برای آبکشت ۵/۵ تا ۵/۸ می‌باشد. جذب عنصرهای غذایی منگنز، مس، روی و به ویژه آهن در pH بالا کاهش می‌یابد و جذب عنصرهای فسفر، پتاسیم، کلسیم و منیزیم در pH پایین کم می‌شود. در این شرایط کاهش جذب عنصرهای غذایی و نه کمبود عنصر غذایی در محلول وجود دارد (۶). بنابراین، در این شرایط اندازه‌گیری غلظت عنصرهای محلول غذایی برای تنظیم غلظت محلول جایگزین صحیح نیست. یون فسفات با جذب و دفع هیدروژن، pH را پایدار می‌کند. محلول بازیافتی به‌دلیل آن که فسفر به سرعت در محلول جذب می‌گردد، از قدرت بافری کمتر برخوردار است. بنابراین، با تزریق اسید و باز به‌صورت خودکار pH محلول غذایی کنترل می‌گردد (۵). در آبکشت محلول غذایی قبل از کاربرد با هوا اشباع شده و یا در کل مراحل رشد گیاه، اکسیژن پیوسته در محلول تزریق می‌گردد (۹) و دوره متناوب آبیاری برای هوادهی مفید است (۱۸). کارایی استفاده از آب در فرایند آلی‌سازی گیاه توسط کارایی مصرف آب فتوسنتزی بیان می‌گردد. این شاخص قادر به پیش‌بینی چگونگی بهینه شدن ظرفیت فتوسنتز خالص در واحد آب برگ می‌باشد (۷). کارایی مصرف آب فتوسنتزی یک شاخص مهم در تعیین کارایی آب در رشد گیاه است (۱۵) و شاخص مفید در تعیین عملکرد گیاه در ارتباط با شرایط محیطی می‌باشد (۱۱، ۱۴). هم‌چنین کارایی مصرف آب فتوسنتزی در ارتباط با مصرف بهینه آب گیاهان است (۱۵). کارایی مصرف آب فتوسنتزی بیانگر واکنش گیاه در رقابت برای آب در شرایط خشکی می‌باشد (۲۰). همان‌گونه که اشاره شد، در حال حاضر در دنیا بیشتر از محلول‌های ثابت تغذیه‌ای با کمی تغییرها در مراحل مختلف رشد برای کشت‌های گلخانه‌ای استفاده می‌گردد که به‌دلیل محدودیت‌های مطرح شده از کارایی بالایی در تولید برخوردار نیستند. این آزمایش با به‌کارگیری اصل تعادل توده‌ای در سامانه‌های آبکشت بسته، بهترین غلظت عنصرهای غذایی در محلول جایگزین را بر اساس شاخص عنصرهای غذایی در مراحل مختلف رشد خیار گلخانه‌ای و نسبت مناسب تعرق به رشد گیاه تعیین می‌نماید. هم‌چنین انطباق این روش با کارایی فتوسنتز گیاه در مراحل مختلف رشد تعیین می‌گردد.

۱- Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectroscopy

[Downloaded from journal-irshs.ir on 2026-10-31]

[DOR: 20.1001.1.16807154.1398.20.4.11.4]

مواد و روش‌ها

این آزمایش روی خیار گلخانه‌ای (*Cucumis sativus* cv. Socrates) در گلخانه‌ای در شهر بیضاء در شمال غربی شهرستان شیراز در سال‌های ۱۳۹۷-۱۳۹۶ انجام شد. شرایط گلخانه بر اساس نیاز فیزیولوژیکی گیاه در مراحل مختلف رشد از نظر دما (۱۸ تا ۲۵ درجه سلسیوس)، نور (۱۲ تا ۱۳ هزار لوکس) و رطوبت (۶۰ تا ۷۰٪) تنظیم شد. در هر کرت با توجه به فاصله کشت (۳۵ سانتی‌متر) برای خیار گلخانه‌ای تعداد ۱۲ بوته در نظر گرفته شد. تولید نشاء خیار در فروردین ماه انجام شد و استقرار نشاء خیار در محیط آبکشت در هر دو سال آزمایش در تاریخ ۲۵ فروردین انجام پذیرفت. میانگین عملکرد بوته با توجه به شروع گلدهی و میوه‌دهی در اوایل خردادماه به‌مدت یک‌ماه و به تعداد ۱۰ چین از بوته‌ها اندازه‌گیری شد. در این آزمایش برای محاسبه غلظت محلول جایگزین نیاز به آزمون عنصرهای غذایی در گیاهان مورد بررسی بود تا نسبت آن‌ها با توجه به حد بهینه (جدول ۱) در مراحل مختلف تنظیم گردد. هم‌چنین محلول غذایی پایه مورد استفاده بر اساس روش Adams و Winsor (۱) تهیه گردید (جدول ۲).

جدول ۱- حد بهینه عنصرهای غذایی برگ خیار گلخانه‌ای (سومین تا چهارمین برگ بالغ و کامل توسعه یافته از نقطه رشد انتهایی) در سه مرحله رشد (۱۰).

Table 1. The optimal level of leaf nutrients in greenhouse cucumber (third to fourth full mature and developed leaves from the end growing point) in three stages of growth (10).

رشد رویشی اولیه تا ۱۲ برگی (محلول غذایی آغازین) Initial growth up to 12 leaves (Initial nutrient solution)					
N (%)	P (%)	K (%)	Ca (%)	Mg (%)	S (%)
4.50–6.00	0.34–0.75	3.90–5.00	1.40–3.50	0.30–1.00	0.40–0.70
Fe (mg L^{-1})	Mn (mg L^{-1})	Zn (mg L^{-1})	Cu (mg L^{-1})	B (mg L^{-1})	Mo (mg L^{-1})
50-100	50-100	20-60	5-25	25-65	0.2-0.8
رشد رویشی (محلول غذایی جایگزین در مرحله رویشی قبل از گلدهی) Vegetative growth (substitutional nutrient solution at vegetative stage before blooming)					
N (%)	P (%)	K (%)	Ca (%)	Mg (%)	S (%)
4.50-6.00	0.30-0.70	1.50-2.50	2.20-4.50	0.45-0.75	0.30-0.80
Fe (mg L^{-1})	Mn (mg L^{-1})	Zn (mg L^{-1})	Cu (mg L^{-1})	B (mg L^{-1})	Mo (mg L^{-1})
50-100	30-100	20-60	5-25	25-65	0.3-1.0
رشد زایشی (محلول غذایی جایگزین در مرحله زایشی در شروع گلدهی) Reproductive growth (substitutional nutrient solution at reproductive stage in early blooming stage)					
N (%)	P (%)	K (%)	Ca (%)	Mg (%)	S (%)
2.50-5.00	0.30-0.70	2.50-3.50	1.50-3.50	0.35-0.65	0.30-0.80
Fe (mg L^{-1})	Mn (mg L^{-1})	Zn (mg L^{-1})	Cu (mg L^{-1})	B (mg L^{-1})	Mo (mg L^{-1})
50-100	30-100	20-60	5-25	25-65	0.3-1.0

تنظیم محلول غذایی پایه شامل مرحله رویشی اولیه (کاهش ۰/۵ و یک میلی‌مول در لیتر آمونیوم و پتاسیم و افزایش ۰/۵ و ۰/۲۵ میلی‌مول در لیتر کلسیم و منیزیم و افزایش ۱ میکرومول در لیتر آهن و بُر)، مرحله میوه‌بندی (افزایش یک میلی‌مول در لیتر پتاسیم و نیترات)، مرحله رشد سریع زایشی (کاهش یک میلی‌مول در لیتر پتاسیم و افزایش ۰/۵ میلی‌مول در لیتر کلسیم) و مرحله پایان فصل (کاهش یک میلی‌مول در لیتر آمونیوم و فسفر) بود. در هر مرحله رشد، با توجه به حد بهینه عنصرهای غذایی برگ، ترکیب و غلظت محلول غذایی به‌صورت زیر تعیین و جهت ارزیابی اعمال گردید. آزمایش به‌صورت طرح به‌طورکامل تصادفی با سه تکرار و چهار تیمار اول (S1)، کاربرد محلول پایه (جدول ۲) به‌صورت ثابت و محلول جایگزین به‌طور کامل بر اساس ترکیب و غلظت محلول پایه در هر مرحله رشد (شاهد) اعمال گردید. تیمار دوم (S2)، در هر سه مرحله رشد گیاه، پس از کاربرد محلول پایه، با فرض نسبت وزن خشک به تعرق ۱/۲۰۰ و غلظت مطلوب عنصرهای برگی (جدول ۱)، مقدار عنصر غذایی در وزن خشک برگ تعیین شد، برای هر کیلوگرم رشد گیاه ۲۰۰ لیتر محلول از گیاه عبور می‌کند، بنابراین می‌بایستی مقدار عنصر غذایی در ۲۰۰ لیتر محلول جایگزین وجود داشته باشد (۵). با تقسیم مقدار عنصر غذایی مورد نیاز بر مولاریته عنصر غذایی مقدار مول بر لیتر آن محاسبه و به محلول پایه افزوده و یا از محلول پایه کسر گردید. تیمار سوم (S3)، در هر سه مرحله

[Downloaded from journal-irshs.ir on 2026-10-31]

[DOR: 20.1001.1.16807154.1398.20.4.11.4]

رشد گیاه پس از کاربرد محلول پایه، با فرض نسبت وزن خشک به تعرق ۱/۳۰۰، محلول جایگزین به روش بالا تهیه و به محلول پایه افزوده و یا از محلول پایه کسر شد. تیمار چهارم (S4)، رطوبت پایین، در هر سه مرحله رشد گیاه پس از کاربرد محلول پایه، با فرض نسبت وزن خشک به تعرق ۱/۴۰۰، محلول جایگزین به روش بالا تهیه و به محلول پایه افزوده و یا از محلول پایه کسر گردید. فرض نسبت وزن خشک به تعرق در تعیین تیمارها بر اساس برآورد مناسب مقدار نسبت تعرق به رشد (وزن خشک زیست‌توده) برای محصول‌های مختلف در آبکشت بین ۱/۲۰۰ تا ۱/۴۰۰ مقدار تعرق به کیلوگرم ماده خشک گیاه برای کارایی مصرف آب بالا، متوسط و ضعیف تعیین شد (۵، ۸).

جدول ۲ – محلول غذایی پایه مورد استفاده برای خیار گلخانه‌ای.

Table 2. The basic Stock nutritional solution used for greenhouse cucumber.

محلول غذایی تانک A Tank A nutrient solution			محلول غذایی تانک B Tank B nutrient solution		
Calcium nitrate solid	86	kg	Potassium nitrate	55	kg
Potassium nitrate	18	kg	Monopotassium phosphate	11	kg
Iron EDDHA 6%	1396	g	Magnesium sulphate 16% MgO	34	kg
Manganese EDTA 12.8%	429	g	Monoammonium phosphate	5	kg
Zinc EDTA 14.8%	221	g	Borax 11.3% B	239	g
Copper EDTA 14.8%	32	g	Sodium molybdate 39.6%	12	g

The amount of fertilizers is calculated for a volume of 1000 liters and a 100-fold concentrated nutrient solution.

مقدار کودها برای حجم ۱۰۰۰ لیتر و محلول غذایی ۱۰۰ برابر غلیظ شده محاسبه گردیده است.

میانگین عملکرد بوته با توجه به شروع گلدهی و میوه‌دهی در اوایل خردادماه به‌مدت یک‌ماه و به تعداد ۱۰ چین از بوته‌ها اندازه‌گیری شد. دیگر ویژگی‌های آزمایشی در مراحل مختلف رشد از جمله مقدار عنصرهای غذایی (به‌جز غلظت نیتروژن که توسط روش کجلدال اندازه‌گیری شد) با دستگاه اسپکترومتری نوری پلاسمایی[۱]اندازه‌گیری گردید (۳، ۴ و ۱۹). مقدار تعرق، فتوسنتز خالص و کارایی مصرف آب فتوسنتزی در مراحل مختلف رشد اندازه‌گیری شد. میزان تبادل گازی روی برگ‌های بالغ (سومین و چهارمین برگ از سر شاخه) با استفاده از دستگاه فتوسنتزمتر دستی نوع باز سیستم تبادلی[۲] مدل لیکورن آمریکا با غلظت ثابت ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر در دمای ۲۷ درجه سلسیوس و شدت نور ۱۲۵۰ میکرومول بر مترمربع در ثانیه با طول موج های ۶۷۰ و ۴۶۵ نانومتر اندازه‌گیری شد. کارایی مصرف آب فتوسنتزی لحظه‌ای[۳] (IWUE) از تقسیم میزان فتوسنتز خالص برگ (Pn) به میزان تعرق برگ (E) محاسبه شد. در مراحل مختلف رشد معکوس نسبت کارایی مصرف آب فتوسنتزی[۴] ($\mu molH_2O$ $mol^{-1}CO_2$) برای تعیین نیاز آبی لحظه‌ای[۵] ($\mu molH_2O\ mol^{-1}CO_2$) محاسبه گردید. تجزیه واریانس مرکب داده‌های دو سال آزمایش توسط نرم افزار SAS-9.1 و مقایسه میانگین داده‌ها توسط روش چند دامنه‌ای دانکن ($P\leq 0.05$) انجام شد. رسم نمودارها با نرم افزار Excel 2016 انجام گردید.

نتایج و بحث

نتیجه‌های تجزیه برگی نمونه شاهد یعنی محلول جایگزین (S1) نشان داد که در هر سه مرحله رشد اولیه، رویشی و زایشی، مقادیر عنصرهای نیتروژن، فسفر، پتاسیم و منگنز بیش از میانگین حد بهینه عنصرهای غذایی برگ خیار گلخانه‌ای (جدول ۱) بود، هم‌چنین کمبود کلسیم، منیزیم، گوگرد و بُر مشاهده شد (جدول ۳ و ۴). در تیمار محلول جایگزین (S2)، غلظت برگی نیتروژن، فسفر، پتاسیم و منگنز بیش از میانگین حد بهینه بود، اما مقدار کلسیم، منیزیم و دیگر عنصرهای کم‌مصرف بهبود یافت. در آزمایشی مشاهده شد که در محلول غذایی با ۰/۵ میلی‌مول فسفر در هر روز، فسفر در چند ساعت اولیه جذب شده و

۱- Inductively Coupled Plasma Emission Spectroscopy (ICPS-8100)

۲- LI-COR 6400 XT portable gas analyzer (Li-Cor, Lincoln, NE, USA)

۳- Instantaneous Water Use Efficiency

۴- Instantaneous water requirement

۵- Instantaneous water requirement

[Downloaded from journal-irshs.ir on 2026-10-31]

[DOR: 20.1001.1.16807154.1398.20.4.11.4]

افزودن فسفر به‌طور پیوسته در سطح ۰/۵میلی‌مول در محلول بازیافتی موجب افزایش غلظت فسفر در گیاه به بیشتر از یک درصد ماده خشک شد که سه برابر بالاتر از حد بهینه می‌باشد و این مقدار بالای فسفر موجب کمبود آهن و روی می‌شود (۸). جذب سریع پتاسیم موجب کمبود کلسیم و منیزیم در گیاه می‌شود و کاهش پتاسیم در محلول به‌طور معنی‌دار جذب کلسیم را بهبود بخشیده و از پوسیدگی گلگاه و دیگر نارسایی‌ها در گوجه‌فرنگی جلوگیری می‌کند (۵). بهترین مقدار غلظت عنصرهای غذایی با توجه به حد بهینه عنصرهای غذایی برگ خیار گلخانه‌ای در هر سه مرحله رشد به‌ترتیب مربوط به تیمار محلول جایگزین S3 و محلول جایگزین S4 بود (جدول ۳ و ۴). سطح نیتروژن، فسفر، پتاسیم و منگنز به‌دلیل جذب بیشتر، در محلول غذایی کاهش می‌یابد و ثابت نگه داشتن سطح آن‌ها در محلول غذایی موجب افزایش جذب، مسمومیت و عدم تعادل عنصرهای غذایی در گیاهان می‌شود (۵).

جدول ۳- میانگین غلظت عنصرهای غذایی پرمصرف برگ در مراحل مختلف رشد خیار گلخانه‌ای رقم سوکراتز (نگین).

Table 3. Average concentration of leaf macronutrients in different growth stages of greenhouse cucumber cultivar Socrates (Negin).

تیمارها Treatments	مراحل رشد Growth stages	N (%)	P (%)	K (%)	Ca (%)	Mg (%)	S (%)
محلول غذایی پایه (S1) Basic nutrient solution (S1)	رشد اولیه Initial growth	3.46	0.31	2.53	0.64	0.25	0.32
محلول جایگزین ۱ Substitutional solution (S1)	رشد اولیه Initial growth	6.14	1.35	5.18	0.54	0.26	0.41
	رشد رویشی Vegetative growth	5.94	1.24	3.23	1.04	0.31	0.34
	رشد زایشی Reproductive growth	5.63	1.22	3.34	0.79	0.32	0.40
محلول جایگزین ۲ Substitutional solution (S2)	رشد اولیه Initial growth	5.98	1.53	5.78	2.74	0.89	0.64
	رشد رویشی Vegetative growth	5.54	1.32	2.37	3.87	0.74	0.76
	رشد زایشی Reproductive growth	4.92	0.75	3.17	3.18	0.71	0.72
محلول جایگزین ۳ Substitutional solution (S3)	رشد اولیه Initial growth	5.02	0.94	4.25	1.97	0.63	0.57
	رشد رویشی Vegetative growth	4.62	0.81	1.59	2.67	0.52	0.48
	رشد زایشی Reproductive growth	3.52	0.62	2.84	2.49	0.54	0.52
محلول جایگزین ۴ Substitutional solution (S4)	رشد اولیه Initial growth	4.56	0.98	3.97	2.61	0.66	0.59
	رشد رویشی Vegetative growth	4.86	0.83	2.42	2.84	0.68	0.52
	رشد زایشی Reproductive growth	3.76	0.52	2.83	2.67	0.73	0.69

[Downloaded from journal-irshs.ir on 2026-10-31]

[DOR: 20.1001.1.16807154.1398.20.4.11.4]

جدول ۴- میانگین غلظت عنصرهای غذایی ریزمغذی برگ در مراحل مختلف رشد خیار گلخانه‌ای رقم سوکراتز (نگین).
Table 4. Average concentration of leaf micronutrients in different growth stages of greenhouse cucumber cultivar Socrates (Negin).

تیمار Treatments	مراحل رشد Growth stages	Fe (mg L^{-1})	Mn (mg L^{-1})	Zn (mg L^{-1})	Cu (mg L^{-1})	B (mg L^{-1})	Mo (mg L^{-1})
محلول غذایی پایه (S1) Basic nutrient solution (S1)	رشد اولیه Initial growth	73.45	62.7	27.65	7.84	16.47	0.34
محلول جایگزین (S1) Substitutional Solution (S1)	رشد اولیه Initial growth	79.14	95.46	21.4	6.57	19.12	0.37
	رشد رویشی Vegetative growth	65.24	88.21	24.51	5.47	20.45	0.32
	رشد زایشی Reproductive growth	72.15	94.61	25.74	4.98	23.08	0.33
محلول جایگزین (S2) Substitutional Solution (S2)	رشد اولیه Initial growth	95.41	120.43	54.87	15.41	57.56	0.76
	رشد رویشی Vegetative growth	89.47	114.25	66.41	23.41	64.23	0.74
	رشد زایشی Reproductive growth	94.25	103.42	58.49	21.44	67.12	0.67
محلول جایگزین (S3) Substitutional Solution (S3)	رشد اولیه Initial growth	78.34	90.35	44.23	13.47	45.63	0.58
	رشد رویشی Vegetative growth	68.54	83.56	43.16	17.76	48.72	0.54
	رشد زایشی Reproductive growth	69.05	88.12	42.08	16.33	46.92	0.47
محلول جایگزین (S4) Substitutional Solution (S4)	رشد اولیه Initial growth	76.07	81.60	33.85	9.41	35.36	0.45
	رشد رویشی Vegetative growth	65.07	72.17	39.84	10.76	44.06	0.41
	رشد زایشی Reproductive growth	66.07	79.82	41.12	13.93	43.75	0.44

تیمار محلول جایگزین S3 بیشترین مقدار عملکرد در واحد بوته را به خود اختصاص داد (شکل ۱) و موجب ۹۱/۸٪ افزایش در عملکرد بوته نسبت به تیمار شاهد S1 شد. تیمارهای محلول جایگزین S2 و محلول جایگزین S4 در یک گروه آزمایشی قرار داشته و به ترتیب موجب ۳۳/۸ و ۲۲/۶٪ افزایش در عملکرد بوته نسبت به شاهد شدند.

نتیجه‌های مقایسه میانگین شاخص‌های فتوسنتزی نشان داد که بیشترین مقدار فتوسنتز خالص متعلق به تیمار محلول جایگزین S3 در مرحله رشد رویشی و زایشی بود و پس از آن محلول جایگزین S4 قرار داشت (جدول ۵). بیشترین مقدار تعرق برگی مربوط به تیمار محلول جایگزین S4 بود. هم‌چنین بیشترین مقدار کارایی مصرف آب فتوسنتزی مربوط به تیمار محلول جایگزین S2 و پس از آن محلول جایگزین S3 بود. کمترین مقدار کارایی مصرف آب فتوسنتزی متعلق به تیمار محلول جایگزین S4 بود. بیشترین مقدار کارایی مصرف عنصرهای غذایی و نیز کارایی مصرف آب به مقدار ۱۷۹/۹ کیلوگرم به ازاء هر مترمکعب آب با کاربرد محلول ثابت غذایی در آبکشت بسته خیار گلخانه‌ای تنها با کاهش غلظت ۸۵٪ محلول غذایی در محلول جایگزین،

[Downloaded from journal-irshs.ir on 2026-10-31]

[DOR: 20.1001.1.16807154.1398.20.4.11.4]

به‌دست آمد (۲۳). بیشترین مقدار نیاز آبی لحظه‌ای مربوط به تیمارهای محلول جایگزین S4 و محلول جایگزین S1 در مرحله رشد رویشی و رشد زایشی بود (جدول ۵).

جدول ۵- مقایسه میانگین شاخص‌های فتوسنتزی برگ در مراحل مختلف رشد خیار گلخانه‌ای رقم سوکراتز (نگین).

Table 5. Mean comparison of leaf photosynthetic indices in different growth stages of greenhouse cucumber cultivar Socrates (Negin).

تیمار	مراحل رشد	مقدار فتوسنتز خالص* Net photosynthetic rate (Pn_{max}, $\mu molCO_2 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)	مقدار تعرق Transpiration rate (E, $\mu molH_2O \cdot m^{-2}.s^{-1}$)	کارایی مصرف آب فتوسنتزی لحظه‌ای Instantaneous water use efficiency ($\mu molCO_2$)/($\mu molH_2O$)	نیاز آبی لحظه‌ای Instantaneous water requirement ($\mu molH_2O$)/$molCO_2$)
محلول جایگزین (S1) Substitutional Solution (S1)	رشد اولیه Initial growth	8.2h	2.57e	3.15c	321.8c
	رشد رویشی Vegetative growth	6.23i	2.26e	2.84d	358.5b
	رشد زایشی Reproductive growth	10.46g	3.92d	2.62d	389.2a
محلول جایگزین (S2) Substitutional Solution (S2)	رشد اولیه Initial growth	11.84fg	2.42e	4.94ab	209.7d
	رشد رویشی Vegetative growth	13.42e	2.63e	5.05a	199.8d
	رشد زایشی Reproductive growth	14.35de	2.95e	4.87b	202.1d
محلول جایگزین (S3) Substitutional Solution (S3)	رشد اولیه Initial growth	16.36c	4.84d	3.34c	291.5c
	رشد رویشی Vegetative growth	19.48a	5.96bc	3.25c	311.4c
	رشد زایشی Reproductive growth	18.75ab	5.74c	3.17cd	317.9c
محلول جایگزین (S4) Substitutional Solution (S4)	رشد اولیه Initial growth	17.45b	6.53b	2.71d	369.7b
	رشد رویشی Vegetative growth	16.62c	6.89ab	2.45e	405.6a
	رشد زایشی Reproductive growth	17.31bc	7.47a	3.31e	425.9a

*The average values with the same letters in each column do not have statistically significant difference ($P \leq 0.05$).

میانگین‌های دارای حرف‌های مشابه در هر ستون، اختلاف آماری معنی‌دار ندارند ($P \leq 0.05$).

[Downloaded from journal-irshs.ir on 2026-10-31]

[DOR: 20.1001.1.16807154.1398.20.4.11.4]

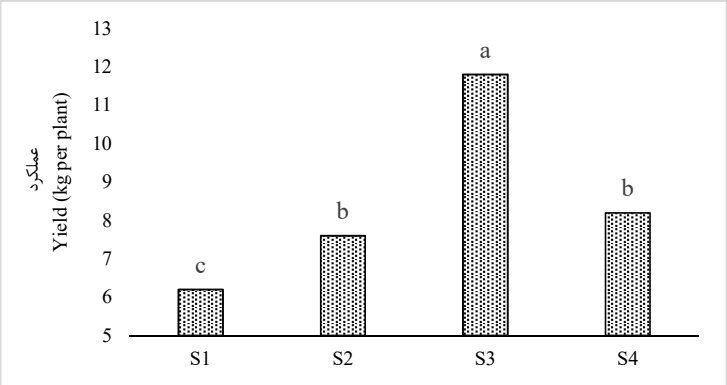


Fig. 1. Effect of experimental treatments on average yield of greenhouse cucumber cultivar Socrates (Negin) columns with different letters have significant difference at 5% statistical level.

شکل ۱- اثر تیمارهای آزمایش بر میانگین عملکرد بوته خیار گلخانه‌ای رقم سوکراتز (نگین) ستون های دارای حروف مختلف دارای اختلاف معنی دار در سطح ۵ درصد آماری می باشند.

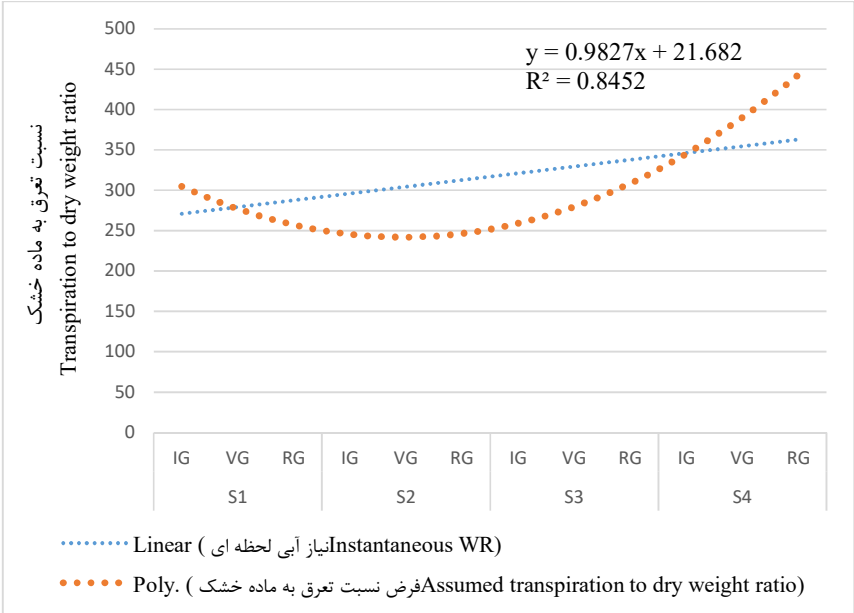


Fig. 2. Regression relationship between instantaneous water requirement and experimental assumption of transpiration ratio to dry weight (S1, S2, S3 and S4) at different stages of initial growth (IG), vegetative growth (VG) and reproductive growth (RG) of greenhouse cucumber in Socrates cultivar (Negin).

شکل ۲ - رابطه رگرسیونی بین نیاز آبی لحظه‌ای و فرض نسبت تعرق به ماده خشک تیمارهای آزمایش (S1، S2، S3 و S4) در مراحل مختلف رشد اولیه، رویشی و زایشی خیار گلخانه‌ای رقم سوکراتز (نگین).

نسبت مقدار نیاز آبی لحظه‌ای به‌طور معنی‌دار مطابق با فرض نسبت وزن خشک به تعرق تیمارهای آزمایشی بود ($r = 0.92$) (شکل ۲)، که امکان استفاده از این شاخص در تعیین بهترین غلظت محلول جایگزین در هر شرایط گلخانه‌ای مطابق با نیاز فیزیولوژیکی گیاه را فراهم می‌آورد. میانگین داده‌های نیاز آبی لحظه‌ای میکرومول آب به میلی‌مول دی‌اکسید کربن در دامنه ۲۰۰ تا ۴۰۰ لیتر آب به کیلوگرم ماده خشک بود (شکل ۳). برآورد مناسب مقدار نسبت تعرق به رشد برای محصول‌های مختلف در آبکشت بین ۱/۲۰۰ تا ۱/۴۰۰ لیتر آب تعرق به کیلوگرم ماده خشک گیاه می‌باشد (۵ و ۸). نسبت صحیح بستگی به رطوبت

[Downloaded from journal-irshs.ir on 2026-10-31]

[DOR: 20.1001.1.16807154.1398.20.4.11.4]

هوا دارد، رطوبت کم تعرق را افزایش می‌دهد، اما مقدار رشد تغییر نمی‌کند (۲۰). از سویی، افزایش دی‌اکسید کربن و فتوسنتز موجب افزایش نسبت رشد و بهبود این نسبت به ۱/۲۰۰ می‌گردد. همان‌گونه که در جدول ۶ مشاهده می‌گردد، رابطه مثبت و معنی‌دار ($P\leq 0.01$) بین مقدار تعرق و فتوسنتز خالص خیار گلخانه‌ای رقم سوکراتز (نگین) وجود داشت. اما از سوی دیگر رابطه منفی و معنی‌دار ($P\leq 0.05$) بین مقدار تعرق و کارایی مصرف آب فتوسنتزی مشاهده شد. بنابراین، رطوبت کم در محیط گلخانه موجب افزایش تعرق و کاهش کارایی مصرف آب فتوسنتزی شد (۱۵). رابطه مثبت و معنی‌دار ($P\leq 0.01$) بین مقدار تعرق و نیاز آبی لحظه‌ای در این رقم مشاهده شد. در عین حال ارتباط منفی و معنی‌دار ($P\leq 0.01$) بین کارایی مصرف آب فتوسنتزی و نیاز آبی لحظه‌ای وجود داشت. بنابراین، با افزایش نیاز آبی لحظه‌ای، کارایی مصرف آب فتوسنتزی به‌طور معنی‌دار کاهش می‌یابد.

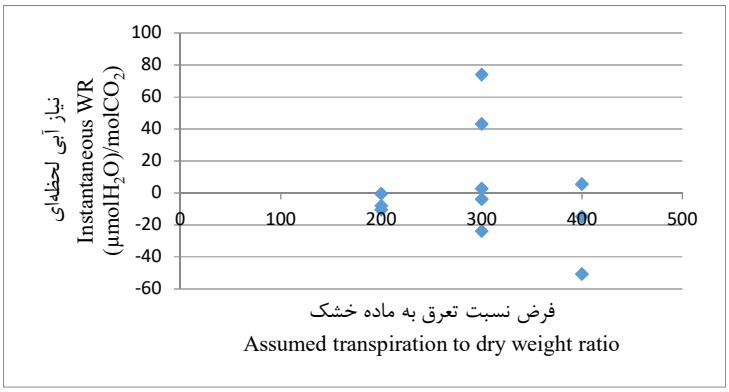


Fig. 3. Frequency and distribution of means of instantaneous water requirement in the range of transpiration ratio to dry weight of greenhouse cucumber in Socrates cultivar (Negin).

شکل ۳- فراوانی و پراکنش میانگین نیاز آبی لحظه‌ای در دامنه نسبت تعرق به ماده خشک خیار گلخانه‌ای رقم سوکراتز (نگین).

جدول ۶- ضرایب همبستگی بین ویژگی‌های فتوسنتزی خیار گلخانه‌ای رقم سوکراتز (نگین).

Table 6. Correlation coefficients of photosynthetic characteristics of greenhouse cucumber in Socrates cultivar (Negin).

	مقدار فتوسنتز خالص Net photosynthetic rate	مقدار تعرق Transpiration rate	کارایی مصرف آب فتوسنتزی Instantaneous WUE	نیاز آبی لحظه‌ای Instantaneous WR
مقدار فتوسنتز خالص Net photosynthetic rate	1			
مقدار تعرق Transpiration rate	0.805694**†	1		
کارایی مصرف آب فتوسنتزی Instantaneous WUE	-0.05971	-0.54118*	1	
نیاز آبی لحظه‌ای Instantaneous WR	0.092471	0.651812**	-0.90579**	1

†** Significant at a statistical level of 1% * Significant at a statistical level of 5%.

** معنی‌دار در سطح آماری یک درصد و * معنی‌دار در سطح آماری پنج درصد می‌باشند.

با توجه به نتیجه‌های این آزمایش مشاهده شد که با استفاده از غلظت عنصرهای غذایی برگی و تعیین بهترین نسبت تعرق به ماده خشک براساس نیاز آبی لحظه‌ای می‌توان غلظت و ترکیب مناسب محلول غذایی جایگزین در هر مرحله رشد را تنظیم و به‌کار گرفت. این نتیجه‌ها با نتیجه‌های به‌دست آمده که نشان داد تجزیه برگی با فاصله زمانی مشخص در دوره رشد و تنظیم آن با حد بهینه، برای تعیین ترکیب محلول جایگزین مناسب بوده و پس از تصحیح و بهینه‌سازی سطح عنصرهای غذایی برگ، برای دوره‌های کشت بعد ضروری نمی‌باشد (۵، ۱۷)، مطابقت دارد. هم‌چنین نتیجه‌های این بررسی با توجه به تعیین نیاز آبی لحظه‌ای برای تیمارهای آزمایش، منطبق با نتیجه‌های به‌دست آمده در کاربرد محلول غذایی جایگزین بر اساس مقدار جذب عنصرهای غذایی و نسبت تعرق به توده زیستی در گوجه‌فرنگی بود (۲۲). کاربرد این روش با نیاز واقعی گیاه تطابق بیشتری داشته و گیاه از تعادل تغذیه‌ای و عملکرد مناسب‌تری برخوردار می‌باشد.

[Downloaded from journal-irshs.ir on 2026-10-31]

[DOR: 20.1001.1.16807154.1398.20.4.11.4]

نتیجه‌گیری

نتیجه‌های این پژوهش نشان داد که تیمار محلول جایگزین S3 بر اساس اصل جریان توده‌ای به‌ویژه در مرحله رشد رویشی و زایشی موجب بهبود مقادیر غلظت عنصرهای غذایی برگ خیار گلخانه‌ای با توجه به حد بهینه عنصرهای غذایی شد. هم‌چنین بیشترین مقدار فتوسنتز خالص متعلق به تیمار محلول جایگزین S3 بود. اگرچه کارایی مصرف آب فتوسنتزی تیمار محلول جایگزین S3 کمتر از تیمار محلول جایگزین S2 بود، اما انطباق آن با شرایط محیطی گلخانه موجب افزایش مقدار عملکرد بوته شد که به عنوان بهترین تیمار در تهیه محلول جایگزین کشت هیدروپونیک بسته در شرایط گلخانه‌های خیار موجود معرفی می‌گردد. انطباق مقادیر نسبت نیاز آبی لحظه‌ای با فرض نسبت وزن خشک به تعرق تیمارهای آزمایش نشان داد که امکان استفاده از این شاخص در تعیین بهترین غلظت محلول جایگزین بر اساس اصل جریان توده‌ای در هر شرایط گلخانه‌ای وجود دارد و تکرارپذیری شرایط گلخانه‌ای ثبات کاربرد محلول‌های جایگزین را در مراحل مختلف رشد بدون اندازه‌گیری دوباره شاخص‌ها ایجاد می‌کند.

References منابع

1. Adams, P., and G.W. Winsor. 1978. Nutrient uptake. Ann. Rep. Glasshouse Crops Res. Inst., 84–5.
2. Alatorre-Cobos F. 2014. An improved, low-cost, hydroponic system for growing Arabidopsis and other plant species under aseptic conditions. BMC Plant Biol. 14:69–69.
3. Baxter I. 2009. Ionomics: studying the social network of mineral nutrients. Curr. Opin. Plant Biol. 12:381–386.
4. Baxter I. 2010. Ionomics: The functional genomics of elements. Brief Funct Genomics.
5. Bugbee, B. 1994. Nutrient Management in Recirculating Hydroponic Culture. Crop Physiology Laboratory, Utah State University, Logan, UT 84322-4820, USA.
6. Bugbee, B. and F. Salisbury. 1989. Controlled Environment Crop Production: Hydroponic vs. Lunar Regolith. In; Ming, D. and Henninger, D. (eds) Lunar Base Agriculture. Amer. Soc. Agron. Madison, WI.
7. Castellanos, A.E., M.J. Martinez, J.M. Llanoa, W.L. Halvorson, M. Espiricueta and I. Espejel. 2005. Successional trends in Sonoran Desert abandoned agricultural fields in Northern Mexico. J. Arid Environ. 60:437-455.
8. Chaney, R. and B. Coulombe. 1982. Effect of phosphate on regulation of Fe-stress in soybean and peanut. J. Plant Nutr. 5:469-487.
9. Chang, D.C., C.S. Park, S.Y. Kim, Y.B. Lee. 2012. Growth and Tuberization of Hydroponically Grown Potatoes. Potato Research. 55:69–81.
10. De Kreij K and W. Runia. 2001. Dezelfde productie bij recirculatie drain water. Groenten en Fruit/Glasgroenten 11(3):6–7.
11. Funk, J.L. and P.M. Vitousek. 2007. Resource-use efficiency and plant invasion in low resource systems. Nature, 446:1079-1081.
12. Gent, M.P.N. 2012. Composition of hydroponic lettuce: effect of time of day, plant size, and season. J. Sci. Food Agric. 92:542–550.
13. Heins R.D. and M. Yelanich. 2013. Fertilization Regimes Exceed Nutritional Requirements of Greenhouse crops. I.F.A.C. Proceedings Vol. 46 (4):5-8.
14. Huang, Z., Z. Xu, T.J. Blumfield and K. Bubb. 2008. Effect of mulching on growth, foliar photosynthetic nitrogen and water use efficiency of hardwood plantation in subtropical Australia. Forest. Ecol. Manag. 225:3447-3454.
15. Larcher, W. 2003. Physiological plant ecology: Eco physiology and stress physiology of functional groups. 4th Ed., Springer, Berlin.pp.748.
16. Nguyen, N.T., McInturf, S.A. and D.G. Mendoza-Cózatl, 2016. Hydroponics: A Versatile System to Study Nutrient Allocation and Plant Responses to Nutrient Availability and Exposure to Toxic Elements. J. Vis Exp. (113):54317.
17. Pii, Y., Cesco, S. and T. Mimmo. 2015. Shoot ionome to predict the synergism and antagonism between nutrients as affected by substrate and physiological status. Plant Physiol. Biochem. 94:48–56.
18. Resh, H.M. 2012. Hydroponic Food Production: A Definitive Guidebook for the Advanced Home Gardener and the Commercial Hydroponic Grower, Seventh Edition. CRC Press; pp. 199–292.
19. Salt, D.E. 2004. Update on plant ionomics. Plant Physiol.136: 2451–2456.
20. Schulze, E. D., E. Back and K. Müller Hohenstein. 2005. Plant Ecology. Springer, Berlin, Heidelberg. pp. 542.
21. Sharma N., S. Acharya, K. Kumar, N. Singh and O.P. Chaurasia. 2018. Hydroponics as an advanced technique for vegetable production: An overview. J. Soil Water Cons. 17(4):364-371.
22. Signore A., F. Serio and P. Santamaria. 2016. A Targeted Management of the Nutrient Solution in a Soilless Tomato Crop According to Plant Needs. Front. Plant Sci. 7:1-15.
23. Singh, M.C. and K.G. Singh. 2019. Nutrient and Water Use Efficiency of Cucumbers Grown in Soilless Media under a Naturally Ventilated Greenhouse. J. Agr. Sci. Tech. 21:193-207.

[Downloaded from journal-irshs.ir on 2026-10-31]

[DOR: 20.1001.1.16807154.1398.20.4.11.4]

Iranian Journal of Horticultural Science and Technology 20 (4): 467 - 476 (2019)
Research article

Evaluation of Mass Balance Method to Determine Nutrients Concentration of Substitutional Solution in Soilless Closed Hydroponic System of Greenhouse Cucumber

M.S. Tadayon*[1]

In Iran, due to shortage of water resources, the application of closed hydroponic systems is one of the priorities of research on the development of greenhouse cultivation. In these conditions, there is a strong need for reuse of nutritional solutions due to the high economic costs and environmental problems. Replacing the base nutrient solution in a constant manner at each growth stage causes a nutritional imbalance in closed hydroponic system. In this experiment, this technique was evaluated to determine the most suitable concentration of substitutional solutions in a closed hydroponic system for greenhouse cucumber. The experiment was conducted in a completely randomized design with three replications and four treatments. The experimental treatments contained fixed solution (control) and application of the base solution and replacement of the nutrient solution adjusted in different stages of growth by assuming dry weight ratio (kg) to transpiration (liters) in three levels (1/200, 1/300 and 1/400). Substitutional solution of dry weight to transpiration ratio of 1/300 improved the leaf nutrient concentration of cucumber and had the maximum yield per plant and net photosynthesis rate. The highest efficiency of photosynthetic water use was related to the solution of dry weight to transpiration ratio of 1/200.

Keywords: Hydroponic culture, Nutrition, Nutrient solution formula, Greenhouse.

1. Associate Professor of Soil and Water Research Department, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Shiraz, Iran.
* Correspondent Author, Email: (m.tadayon@areeo.ac.ir).

[Downloaded from journal-irshs.ir on 2026-10-31]

[DOR: 20.1001.1.16807154.1398.20.4.11.4]