

## ارزیابی روش تعادل توده‌ای در تعیین غلظت عنصرهای غذایی محلول جایگزین در سیستم بسته کشت هیدروپونیک خیار گلخانه‌ای<sup>۱</sup>

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

محمد سعید تدین<sup>۲</sup>

#### چکیده

در ایران به دلیل کمبود منابع آبی کاربرد سامانه‌های آبکشت بسته در اولویت‌های پژوهشی گسترش کشت گلخانه‌ها قرار دارد. در این شرایط، به دلیل هزینه اقتصادی زیاد و دشواری‌های زیست‌محیطی، نیاز شدیدی به بازیافت و استفاده دوباره از محلول‌های غذایی وجود دارد. جایگزینی محلول پایه به صورت 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 به صورت طرح به‌طور کامل تصادفی با سه تکرار و چهار تیمار کاربرد محلول پایه به صورت 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)  $1/200$ ،  $1/300$  و  $1/400$  با کارایی مصرف آب بالا، متوسط و ضعیف انجام شد. تیمار محلول جایگزین نسبت وزن خشک به تعرق  $1/300$  موجب بهبود مقدار غلظت عنصرهای غذایی برگ خیار گلخانه‌ای شد و بیشترین مقدار عملکرد در واحد بوته و مقدار فتوسنتر خالص را به خود اختصاص داد. بیشترین کارایی مصرف آب فتوسنتری مربوط به تیمار محلول جایگزین نسبت وزن خشک به تعرق  $1/200$  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 به دلیل 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 تنیش‌های محیطی رو به گسترش است، توسعه گلخانه‌ها یک انتخاب نیست بلکه یک ضرورت است. سامانه جریان نازک محلول غذایی<sup>۳</sup> یکی از متدائل ترین 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 تربیjt کشاورزی.

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

۳- Nutrient Film Technique

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 گسترهاتر 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 گستردگی 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 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 نمی‌باشد و عنصرهای کم مصرف نقش بسیار کمی (۱۱٪) در هدایت الکتریکی محلول غذایی دارند. کلسیم به‌طور غیر فعال جذب گیاه می‌شود و انتقال دوباره آن در آوند آبکشن به‌کندی اتفاق می‌افتد. مشاهده شده است که انباست کلسیم تا ۲۰ میلی‌مول (که ۱۰ برابر بیشتر از غلظت آن در محلول هوگلند می‌باشد) اتفاق می‌افتد و در این شرایط محلول پاشی 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 می‌باشد 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 طرفیت 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 رقبت 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 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.

## مواد و روش‌ها

این آزمایش روی خیار گلخانه‌ای (*Cucumis sativus* cv. Socrates) در گلخانه‌ای در شهر بیضاء در شمال غربی شهرستان شیراز در سال‌های ۱۳۹۶-۱۳۹۷ 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 به مدت 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 Winsor و Adams (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 <sup>-1</sup> )	Mn (mg L <sup>-1</sup> )	Zn (mg L <sup>-1</sup> )	Cu (mg L <sup>-1</sup> )	B (mg L <sup>-1</sup> )	Mo (mg L <sup>-1</sup> )
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 <sup>-1</sup> )	Mn (mg L <sup>-1</sup> )	Zn (mg L <sup>-1</sup> )	Cu (mg L <sup>-1</sup> )	B (mg L <sup>-1</sup> )	Mo (mg L <sup>-1</sup> )
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 <sup>-1</sup> )	Mn (mg L <sup>-1</sup> )	Zn (mg L <sup>-1</sup> )	Cu (mg L <sup>-1</sup> )	B (mg L <sup>-1</sup> )	Mo (mg L <sup>-1</sup> )
50-100	30-100	20-60	5-25	25-65	0.3-1.0

تنظیم محلول غذایی پایه شامل مرحله رویشی اولیه (کاهش ۵٪ و یک میلی‌مول در لیتر آمونیوم و پتاسیم و افزایش 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 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 به صورت زیر تعیین و جهت ارزیابی اعمال گردید. آزمایش به صورت طرح به طور کامل تصادفی با سه تکرار و چهار تیمار اول (S1)، کاربرد محلول پایه (جدول ۲) به صورت ثابت و محلول جایگزین به طور 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

رشد گیاه پس از کاربرد محلول پایه، با فرض نسبت وزن خشک به تعرق  $1/300$ ، 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  $1/400$ ، 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 تیمارها بر اساس برآورد مناسب مقدار نسبت تعرق به رشد (وزن خشک زیست‌توده) برای محصول‌های مختلف در آبکشت بین  $1/200$  تا  $1/400$  مقدار تعرق به کیلوگرم ماده خشک گیاه برای کارابی 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.

Tank A nutrient solution			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 غایی شده محاسبه گردیده است.

میانگین عملکرد بوته با توجه به شروع گلدهی و میوه‌دهی در اوایل خرداماه به مدت یکماه و به تعداد ۱۰ چین از بوته‌ها اندازه‌گیری شد. دیگر ویژگی‌های آزمایشی در مراحل مختلف رشد از جمله مقدار عنصرهای غذایی (به جز غلظت نیتروژن که توسط روش کجلال اندازه‌گیری شد) با دستگاه اسپکترومتری نوری پلاسمایی اندازه‌گیری گردید (۳، ۴ و ۱۹). مقدار تعرق، فتوسنتر خالص و کارابی مصرف آب فتوسنتری در مراحل مختلف رشد اندازه‌گیری شد. میزان تبادل گازی روی برگ‌های بالغ (سومین و چهارمین برگ از سر شاخه) با استفاده از دستگاه فتوسنترمتر دستی نوع باز سیستم تبادلی<sup>۱</sup> مدل لیکورن آمریکا با غلظت ثابت ۴۰۰ میلی‌گرم در لیتر در دمای ۲۷ درجه سلسیوس و شدت نور ۱۲۵ میکرومول بر مترمربع در ثانیه با طول موج ۶۷۰ و ۴۶۵ نانومتر اندازه‌گیری شد. کارابی مصرف آب فتوسنتری لحظه‌ای<sup>۲</sup> (IWUE) از تقسیم میزان فتوسنتر خالص برگ‌های میزان تعرق برگ (E) محاسبه شد. در مراحل مختلف رشد معکوس نسبت کارابی مصرف آب فتوسنتری<sup>۳</sup> ( $\mu\text{molH}_2\text{O}$ ) ( $\mu\text{molCO}_2$ ) برای تعیین نیاز آبی لحظه‌ای<sup>۴</sup> محاسبه شد. در تیمار مختلط رشد معکوس نسبت کارابی مصرف آب فتوسنتری<sup>۴</sup> ( $\mu\text{molH}_2\text{O}$ ) ( $\mu\text{molCO}_2$ ) برای آزمایش توسعه 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 بر 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 کم‌صرف بهبود یافت. در آزمایش مشاهده شد که در محلول غذایی با  $0.5$  میلی‌مول فسفر در هر روز، فسفر در چند ساعت اولیه جذب شده و

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

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

Instantaneous water requirement -۳ Instantaneous water requirement -۴

افزودن فسفر به طور پیوسته در سطح ۵٪ میلی‌مول 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 به طور 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 به ترتیب 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 (%)
Basic nutrient solution (S1) Mحلول غذایی پایه	رشد اولیه Initial growth	3.46	0.31	2.53	0.64	0.25	0.32
	رشد اولیه Initial growth	6.14	1.35	5.18	0.54	0.26	0.41
Substitutional solution (S1) محلول جایگزین ۱	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
Substitutional solution (S2) محلول جایگزین ۲	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
Substitutional solution (S3) محلول جایگزین ۳	رشد زایشی Reproductive growth	4.92	0.75	3.17	3.18	0.71	0.72
	رشد اولیه Initial growth	5.02	0.94	4.25	1.97	0.63	0.57
Substitutional solution (S4) محلول جایگزین ۴	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
	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

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 <sup>-1</sup> )	Mn (mg L <sup>-1</sup> )	Zn (mg L <sup>-1</sup> )	Cu (mg L <sup>-1</sup> )	B (mg L <sup>-1</sup> )	Mo (mg L <sup>-1</sup> )
Basic nutrient solution (S1) محلول غذایی پایه (S1)	رشد اولیه Initial growth	73.45	62.7	27.65	7.84	16.47	0.34
	رشد اولیه Initial growth	79.14	95.46	21.4	6.57	19.12	0.37
Substitutional Solution (S1) محلول جایگزین (S1)	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
Substitutional Solution (S2) محلول جایگزین (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
Substitutional Solution (S3) محلول جایگزین (S3)	رشد زایشی Reproductive growth	94.25	103.42	58.49	21.44	67.12	0.67
	رشد اولیه Initial growth	78.34	90.35	44.23	13.47	45.63	0.58
Substitutional Solution (S4) محلول جایگزین (S4)	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
	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،

به دست 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 <sup>*</sup> Net photosynthetic rate (Pn <sub>max</sub> , μmolCO <sub>2</sub> ·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	مقدار تعرق Transpiration rate (E, μmolH <sub>2</sub> O·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	کارایی مصرف آب فتوسنتزی لحظه‌ای Instantaneous water use efficiency (μmolCO <sub>2</sub> )/(μmolH <sub>2</sub> O)	نیاز آبی لحظه‌ای Instantaneous water requirement (μmolH <sub>2</sub> O)/molCO <sub>2</sub> )
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
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
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
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 ( $P \leq 0.05$ ).

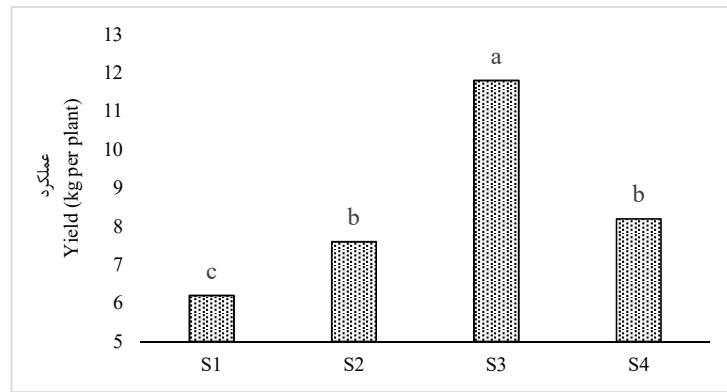


Fig. 1. Effect of experimental treatments on average yield of greenhouse cucumber cultivar Socrates (Negin) columns with different letters have significant difference at 5% statistical level.

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.

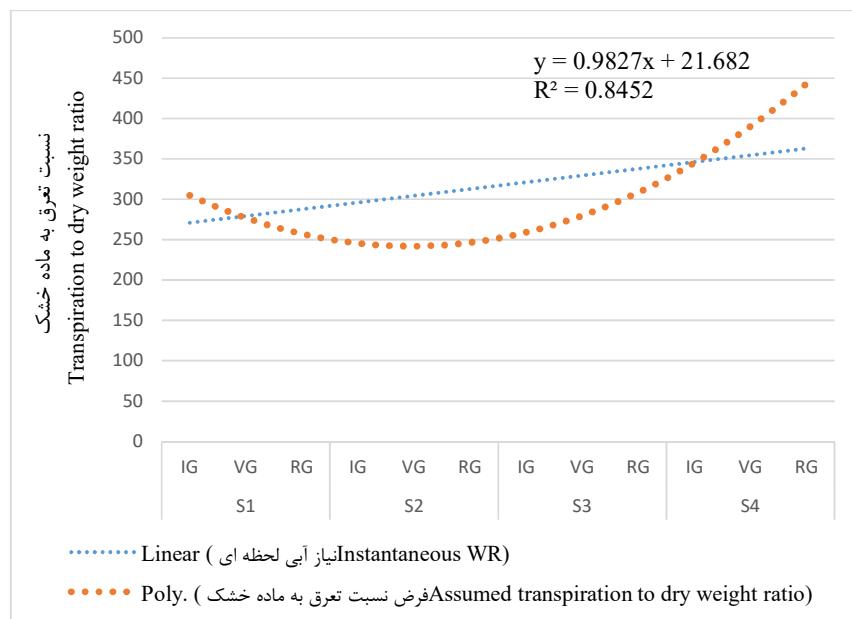


Fig. 2. Regression relationship between instantaneous water requirement and experimental assumption of transpiration ratio to dry weight (S1, S2, S3 and S4) at different stages of initial growth (IG), vegetative growth (VG) and reproductive growth (RG) of greenhouse cucumber in Socrates cultivar (Negin).

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 به طور معنی‌دار مطابق با فرض نسبت وزن خشک به تعرق میانگین 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 ۱/۴۰۰ تا ۱/۲۰۰ لیتر آب تعرق به کیلوگرم ماده خشک گیاه می‌باشد (۵ و ۸). نسبت صحیح بستگی به رطوبت

هوا دارد، رطوبت کم تعرق را افزایش می‌دهد، اما مقدار رشد تغییر نمی‌کند (۲۰). از سویی، افزایش دی‌اکسید کربن و فتوسنتر موجب افزایش نسبت رشد و بهبود این نسبت به  $1/200$  می‌گردد. همان‌گونه که در جدول ۶ مشاهده می‌گردد، رابطه مثبت و معنی‌دار ( $P \leq 0.01$ ) بین مقدار تعرق و فتوسنتر 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 فتوسنتری مشاهده شد. بنابراین، رطوبت کم در محیط گلخانه موجب افزایش تعرق و کاهش کارایی مصرف آب فتوسنتری 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 فتوسنتری و نیاز آبی لحظه‌ای وجود داشت. بنابراین، با افزایش نیاز آبی لحظه‌ای، کارایی مصرف آب فتوسنتری به‌طور معنی‌دار کاهش می‌یابد.

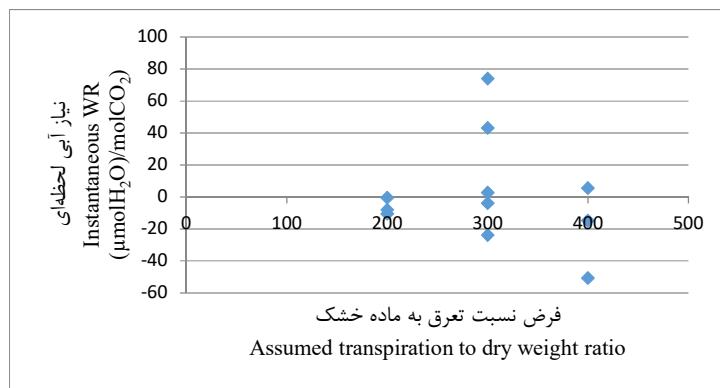


Fig. 3. Frequency and distribution of means of instantaneous water requirement in the range of transpiration ratio to dry weight of greenhouse cucumber in Socrates cultivar (Negin).

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 فتوسنتری خیار گلخانه‌ای رقم سوکراتز (نگین).

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

	مقدار فتوسنتر خالص Net photosynthetic rate	مقدار تعرق Transpiration rate	کارایی مصرف آب فتوسنتری Instantaneous WUE	نیاز آبی لحظه‌ای Instantaneous WR
مقدار فتوسنتر خالص Net photosynthetic rate	1			
مقدار تعرق Transpiration rate	0.805694**†	1		
کارایی مصرف آب فتوسنتری 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 می‌باشد.

با توجه به نتیجه‌های این آزمایش مشاهده شد که با استفاده از خلخلت 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 به کار گرفت. این نتیجه‌ها با نتیجه‌های بدست 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 بدست 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.

## نتيجه‌گيري

نتيجه‌های اين پژوهش نشان داد که تيمار محلول جايگزين S3 بر اساس اصل جريان توده‌اي بهويشه در مرحله رشد روبيشي و زايشي موجب بهبود مقادير غلظت عنصرهای غذائي برگ خيار گلخانه‌اي با توجه به حد بهينه عنصرهای غذائي شد. همچنان بيشترین مقدار فتوسنتز خالص متعلق به تيمار محلول جايگزين S3 بود. اگرچه كارابي مصرف آب فتوسنتزی تيمار محلول جايگزين S3 كمتر از تيمار محلول جايگزين S2 بود، اما انطباق آن با شرایط محيطی گلخانه موجب افزایش مقدار عملکرد بوته شد که به عنوان بهترین تيمار در تهييه محلول جايگزين كشت هيبروپونيك بسته در شرایط گلخانه‌اي خيار موجود معروفي می‌گردد. انطباق مقادير نسبت نياز آبی لحظه‌اي با فرض نسبت وزن خشك به تعرق تيمارهای آزمایش نشان داد که امكان استفاده از اين شاخص در تعیین بهترین غلظت محلول جايگزين بر اساس اصل جريان توده‌اي در هر شرایط گلخانه‌اي وجود دارد و تكرارپذيری شرایط گلخانه‌اي ثبات کاربرد محلول‌های جايگزين را در مراحل مختلف رشد بدون اندازه‌گيري دوباره شاخص‌ها ايجاد می‌کند.

## منابع

### References

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.

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

**M.S. Tadayon<sup>\*1</sup>**

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).