J. Soil and Plant Interactions, Vol. 14, No. 1, Spring 2023, pp. 31-51. Research Article
https://jspi.iut.ac.ir EISSN: 2783-5286 DOI: 10.47176/jspi.14.1.20751

# The Effect of Ionic Composition of The Nutrient Solutions on Growth, Macronutrients Concentration and Yield of Two Fodder Maize (*Zea mays* L.) Cultivars in Soilless Culture

**M. Ghorbani[1*], Sh. Kiani[1], A. Moharrery[2] and S. Fallah[3]**

(Received: 8 February 2023; Accepted: 5 April 2023)

## Abstract

Little information is available concerning ionic composition of the suitable nutrient solution for fodder maize production in soilless culture. Therefore, the aim of this study was to select a basic nutrient solution for production of fodder maize in soilless culture. A pot experiment was carried out as a factorial in a randomized complete block design with two factors of nutrient solutions and cultivar types and four replications in the research greenhouse of Shahrekord University. The nutrient solutions were: 1) full-strength Hoagland and Arnon, 2) half-strength Hoagland and Arnon, 3) Barry and Miller, 4) Alexander et al., and 5) Ruakura. Two maize cultivars of single cross hybrid 704 and single cross 410 were used. The results indicated that in both maize cultivars, the highest concentrations of nitrogen and phosphorus in leaf, stem and root were observed in the plants nourished with Ruakura nutrient solution. The application of Alexander et al. nutrient solution led to significant increase in potassium concentrations in leaf, stem, and root compared to other nutrient solutions. Optimum supply of nutrient requirements of maize with Ruakura nutrient solution resulted in significant increase in plant height, stem diameter, leaf area and leaf greenness index. In both maize cultivars, the highest shoot fresh and dry weights as well as water use efficiency were obtained in the plants nourished with Ruakura nutrient solution. Based on the results, application of Ruakura nutrient solution is suggested for the cultivation of both maize cultivars (i.e., single cross hybrid 704 and single cross 410) in soilless culture in order to produce fodder under the conditions similar to this study.

**Keywords:** Hydroponic, Balanced nutrition, Vegetative growth indices, Water use efficiency.

**Background and Objective:** Sustainable fodder production for feeding livestock is regarded as one of the challenges of agricultural sector in the recent years. One of the recently used methods for fodder production is hydroponic system (i.e., soilless culture). In soilless culture, all essential nutrients are supplied to the plant's roots by nutrient solution. The factors such as plant species and cultivar type, the type of hydroponic system (open and closed), plant growth stage, edible part of the plant, growing season and weather conditions (temperature, light intensity and day length) are effective in choosing a suitable nutrient solution (1). Therefore, choosing the optimum nutrient solution is the fundamental key to success in this cultivation

1- Soil Science and Engineering Department, Faculty of Agriculture, Shahrekord University.
2- Animal Science Department, Faculty of Agriculture, Shahrekord University.
3- Agronomy Department, Faculty of Agriculture, Shahrekord University.
*Corresponding author, Email: maryamghorbani@uoz.ac.ir

method. Considering the lack of sufficient information about ionic composition of the nutrient solution for production of fodder maize in soilless culture, the present study was carried out to select optimum nutrient solution for its production at the greenhouse conditions of Shahrekord University.

**Methods:** A factorial experiment using randomized complete block design was conducted with the two factors of nutrient solutions and maize cultivars (i.e., single cross hybrid 704 and single cross 410) and four replications in hydroponic culture at the research greenhouse of Shahrekord University. The nutrient solutions were: 1) full-strength Hoagland and Arnon, 2) half-strength Hoagland and Arnon, 3) Barry and Miller, 4) Alexander et al., and 5) Ruakura. Maize seedlings were transferred to 10 liter plastic pots containing perlite (with particle size of 0.5 to 5 mm) and were manually fertigated with nutrient solutions on a daily basis. At the end of tasseling stage, plant height, stem diameter, leaf greenness index and leaf area were measured. Then, plants were harvested and fresh weights of root, stem and leaf were determined. Plant biomasses were dried and dry weights of root, stem and leaf were measured. Plant samples were ground and the concentrations of N, P and K were measured in each part. In addition, water use efficiency was calculated by dividing shoot dry weight to the volume of the applied nutrient solution. Analysis of variance was performed using the SAS software. Means comparison was conducted using Duncan's multi-range test at $p < 0.05$.

**Results:** The results showed that the highest concentrations of nitrogen in leaf (31.5 g $kg^{-1}$) and stem (21.7 g $kg^{-1}$) were observed in the plants nourished with Ruakura nutrient solution in single cross hybrid 704. The root nitrogen concentration had a trend similar to the values in leaf and stem, and reached the highest level in the plants fed with Ruakura nutrient solution. In both maize cultivars, the highest concentration of phosphorus in leaf was observed in the plants fertigated with Ruakura nutrient solution. However, the highest concentrations of potassium in leaf, stem and root were recorded in the plants fed with Alexander et al., nutrient solution. Application of Ruakura nutrient solution led to an increase in the plant height, stem diameter, leaf area and leaf greenness index in both maize cultivars. The results revealed that the highest shoot fresh weights in single cross hybrid 704 (1102 g $plant^{-1}$) and single cross 410 (1076 g $plant^{-1}$) were obtained in the plants nourished with Ruakura nutrient solution. This nutrient solution resulted in the highest water use efficiency in both maize cultivars.

**Conclusions:** The results demonstrated that using Ruakura nutrient solution through optimal supply of the nutrients required for maize production in soilless culture, increased the plant height, stem diameter, leaf area and leaf greenness index in both maize cultivars. This increase led to the highest fresh and dry weights of shoot and root as well as greatest water use efficiency in maize plants. Consequently, in both maize cultivars (i.e., single cross hybrid 704 and single cross 410), application of Ruakura nutrient solution can be recommended for fodder production in the soilless culture under the conditions of the present study.

**References:**

1. Arzani, A., 2007. Commercial and Home Hydroponics. Isfahan University of Technology, Isfahan. (In Persian)

روابط خاک و گیاه / سال چهاردهم / شماره اول / بهار ۱۴۰۲ / صفحات ۵۱-۳۱ مقاله پژوهشی
DOI: 10.47176/jspi.14.1.20751 EISSN: 2783-5286 https://jspi.iut.ac.ir

# تأثیر ترکیب یونی محلول‌های غذایی بر رشد، غلظت عناصر غذایی پرمصرف و عملکرد دو رقم ذرت علوفه‌ای (*Zea mays* L.) در کشت بدون خاک

مریم قربانی[1*]، شهرام کیانی[1]، علی محرری[2] و سینا فلاح[3]

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۱۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱/۱۶)

## چکیده

**دانسته‌های اندکی در مورد ترکیب یونی محلول غذایی مناسب برای تولید ذرت علوفه‌ای در کشت بدون خاک وجود دارد. بنابراین هدف این پژوهش، انتخاب یک محلول غذایی پایه برای تولید ذرت علوفه‌ای در کشت بدون خاک بود. به این منظور یک آزمایش گلدانی با دو عامل نوع محلول غذایی و نوع رقم ذرت علوفه‌ای به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با چهار تکرار در گلخانه پژوهشی دانشگاه شهرکرد انجام شد. محلول‌های غذایی مورد استفاده عبارت بودند از: ۱) محلول غذایی تمام قدرت هوگلند و آرنون، ۲) محلول غذایی نیم‌قدرت هوگلند و آرنون، ۳) محلول غذایی باری و میلر، ۴) محلول غذایی الکساندر و همکاران، و ۵) محلول غذایی رواکورا. همچنین ارقام ذرت علوفه‌ای شامل هیبرید سینگل‌کراس ۷۰۴ و سینگل‌کراس ۴۱۰ بودند. نتایج نشان داد در هر دو رقم، بیش‌ترین غلظت نیتروژن و فسفر برگ، ساقه و ریشه در گیاهان تغذیه‌شده با محلول غذایی رواکورا مشاهده شد. کاربرد محلول غذایی الکساندر و همکاران منجر به افزایش معنی‌دار غلظت پتاسیم برگ، ساقه و ریشه در مقایسه با سایر محلول‌های غذایی شد. تأمین بهینه عناصر غذایی مورد نیاز ذرت توسط محلول غذایی رواکورا منجر به افزایش معنی‌دار ارتفاع گیاه، قطر ساقه، سطح برگ و شاخص سبزینگی برگ شد. در هر دو رقم ذرت بیش‌ترین وزن تازه و خشک شاخساره و کارایی مصرف آب با کاربرد محلول غذایی رواکورا حاصل شد. بر مبنای نتایج این آزمایش، کاربرد محلول غذایی رواکورا برای کشت هر دو رقم ذرت (سینگل‌کراس ۷۰۴ و سینگل‌کراس ۴۱۰) در کشت بدون خاک به‌منظور تولید علوفه در شرایط مشابه این پژوهش پیشنهاد می‌شود.**

**واژه‌های کلیدی:** آب‌کشت، تغذیه متعادل، شاخص‌های رشد رویشی، کارایی مصرف آب.

## مقدمه

تولید علوفه پایدار برای تغذیه دام‌ها یکی از چالش‌های بخش کشاورزی در سال‌های اخیر است. با این‌حال، کاهش تدریجی سطح خاک‌های حاصل‌خیز به دلیل آلودگی‌های محیطی و

۱- گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد
۲- گروه علوم دامی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد
۳- گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد
* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: maryamghorbani@uoz.ac.ir

پدیده شهرنشینی (۱۰) امکان تولید علوفه کافی را کاهش داده است. علاوه بر این، وابستگی شدید بخش کشاورزی به منابع آبی (۴۱) در عصر تغییرات شدید آب و هوایی نیازمند ارائه راهکارهای نوین برای تولید محصولات کشاورزی است. یکی از روش‌هایی که برای تأمین علوفه مورد توجه قرار گرفته، تولید علوفه به روش کشت بدون خاک یا آب‌کشت (هیدروپونیک) است. ابولز و حسین (۱) گزارش کردند که در تولید علوفه به روش کشت بدون خاک در کوتاه‌مدت، علاوه بر صرفه‌جویی در مصرف آب، از هر یک کیلوگرم دانه غلات می‌توان ۸ کیلوگرم علوفه سبز برداشت کرد و همچنین تولید علوفه در سرتاسر سال امکان‌پذیر است (۲۶). اما تولید علوفه به روش کشت بدون خاک در مدت زمان کوتاه که بدون استفاده از محلول غذایی انجام می‌شود، دارای ایرادهایی نیز هست. نتایج برخی از پژوهش‌های انجام‌شده در مورد تأثیر مصرف علوفه سبز تولیدشده به روش کشت بدون خاک در مدت زمان کوتاه بر دام، حاکی از کارایی یکسان (۲۱) و یا حتی کاهش عملکرد دام (۱۶) در مقایسه با جیره غذایی متداول بوده است. در این میان به‌نظر می‌رسد بتوان با تغذیه گیاه و استفاده از محلول غذایی مناسب و افزایش دوره رشد گیاه، ضمن افزایش عملکرد، کیفیت علوفه را نیز بهبود بخشید.

در روش کشت بدون خاک، تمامی عناصر غذایی ضروری مورد نیاز گیاه از طریق محلول غذایی در اختیار ریشه گیاه قرار می‌گیرند. عواملی مانند گونه و رقم گیاهی، نوع سامانه مورد استفاده (باز و بسته)، مرحله رشد گیاه، بخش قابل مصرف گیاه، فصل کاشت و شرایط آب و هوایی (دما، شدت نور و طول روز) در انتخاب یک محلول غذایی مناسب مؤثر هستند (۴). گیاه ذرت (*Zea mays* L.) به دلایلی همچون قیمت کم بذر، تولید زیست‌توده زیاد و داشتن رشد سریع می‌تواند گزینه مناسبی برای تولید علوفه در کشت بدون خاک باشد (۲۷). انتخاب محلول غذایی مناسب کلید اصلی موفقیت در این شیوه کشت است. ساواس و آدامیدیس (۳۳) گزارش کردند که اگر سطوح عناصر غذایی در محلول‌های غذایی بیش از حد مجاز باشد سبب ایجاد سمّیت، از بین رفتن تعادل بین عناصر و کمبود دیگر عناصر می‌شود. علاوه بر غلظت عناصر غذایی، شکل‌های شیمیایی عناصر، دما، pH و رسانایی الکتریکی محلول غذایی نیز می‌تواند بر عملکرد و کیفیت محصول اثر داشته باشد (۳۸). پس از ساخت محلول غذایی، رسانایی الکتریکی و pH آن برای انجام تنظیمات لازم اندازه‌گیری می‌شود. رسانایی الکتریکی اطلاعاتی در مورد ترکیب محلول غذایی ارائه نداده و تمایل متفاوت گیاهان برای عناصر غذایی و همچنین شکل‌های آن‌ها (کاتیون یا آنیون) را در نظر نمی‌گیرد. این موضوع ممکن است در صورت عدم نظارت صحیح منجر به نبود توازن عناصر غذایی در محلول غذایی شود. از طرف دیگر فراهمی عناصر غذایی کم‌مصرف ممکن است به‌شدت تحت تأثیر تغییر pH یا حضور یون‌های دیگر باشد (۳۸).

محلول‌های غذایی متعددی با ترکیب عناصر غذایی متفاوت برای تولید ذرت در آب‌کشت مورد استفاده قرار گرفته‌اند [هوگلند و آرنون، (۱۵)؛ اسمیت و همکاران، (۳۴)؛ باری و میلر، (۶)؛ الکساندر و همکاران، (۳)؛ استوارت و همکاران، (۳۶)؛ آدیمی و همکاران، (۲)]. اسمیت و همکاران (۳۴) نشان دادند که از بین هشت محلول غذایی مورد استفاده (رواکورا، آرنون، اشتاینر، رابینز، بولارد، هوگلند و اشنایدر، لانگ‌اشتون وهویت، میدلتون و توکسوپئوس)، بیش‌ترین عملکرد کل ماده خشک ذرت در گیاهان تغذیه‌شده با محلول غذایی رواکورا مشاهده شد که تفاوت معنی‌داری با بقیه محلول‌ها داشت. آن‌ها گزارش کردند که محلول غذایی رواکورا دارای ترکیب بهینه‌ای از عناصر غذایی بود، درحالی‌که گیاهان تغذیه‌شده با محلول غذایی میدلتون رشد ضعیفی داشتند. استنباط آن‌ها این بود که محلول غذایی میدلتون حاوی غلظت زیادی از فسفر (در حد سمّیت) بوده و سبب بهم‌خوردن تعادل عناصر غذایی و رشد ضعیف گیاهان شده است. آدیمی و همکاران (۲) در تولید ذرت علوفه‌ای به روش کشت بدون خاک از چهار نوع محلول غذایی استاندارد (عصاره علف‌های هرز دریایی)، محلول غذایی آلی، محلول غذایی معدنی (تهیه‌شده از کود شیمیایی) و محلول

غذایی آلی–معدنی (تهیه‌شده از پسماندهای شهری) استفاده کردند. نتایج نشان داد بین عملکرد گیاهان تغذیه‌شده با هر یک از محلول‌های ذکرشده تفاوت معنی‌داری وجود نداشت. آن‌ها استدلال کردند محلول‌های کاربردی دارای مقدار کافی عناصر غذایی برای رسیدن به بیشینه عملکرد بود اگرچه غلظت عناصر غذایی آن‌ها با همدیگر متفاوت بود. نتایج آزمایش‌های کلیک و همکاران (۹) بر روی ذرت در کشت بدون خاک نشان داد با افزایش غلظت پتاسیم در محلول غذایی از یک تا هشت میلی-مولار، غلظت فسفر، کلسیم و منیزیم در شاخساره و ریشه گیاه کاهش یافت. نتایج آزمایش آن‌ها لزوم تعادل بین عناصر غذایی را به وضوح آشکار کرد. بنابراین آزمایش‌های متعددی باید انجام شود تا محدوده بهینه غلظت عناصر غذایی در محلول غذایی برای ذرت مشخص شود.

ارقام ذرت مورد استفاده در این آزمایش، هیبرید سینگل‌کراس ۷۰۴ و سینگل‌کراس ۴۱۰ بودند. هیبرید سینگل‌کراس ۷۰۴، دیررس و مناسب برای کشت در مناطق گرمسیر و یا مناطق دارای فصل رشد نسبتاً طولانی است. این هیبرید دارای بوته‌های قوی، کاملاً بلند و پرشاخه و برگ است. علاوه بر داشتن عملکرد دانه‌ای بسیار مطلوب، محصول علوفه-ای آن هم قابل توجه است. هیبرید سینگل‌کراس ۴۱۰ زودرس بوده و دارای عملکرد دانه و علوفه زیاد و مناسب برای کشت در مناطق مختلف کشور است. با توجه به کمبود دانسته‌ها در مورد ترکیب یونی محلول غذایی برای کشت بدون خاک ذرت علوفه‌ای، پژوهش حاضر به‌منظور انتخاب محلول غذایی پایه برای تولید آن در شرایط گلخانه‌ای در دانشگاه شهرکرد انجام شد.

## مواد و روش‌ها

این آزمایش با دو عامل نوع محلول غذایی و نوع رقم به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در چهار تکرار در گلخانه پژوهشی دانشگاه شهرکرد انجام شد. عامل اول شامل پنج نوع محلول غذایی مختلف بود که عبارتند از: ۱) محلول غذایی تمام قدرت هوگلند و آرنون (۱۵)، ۲) محلول غذایی نیم‌قدرت[1] هوگلند و آرنون (۱۵)، ۳) محلول غذایی باری و میلر (۶)، ۴) محلول غذایی الکساندر و همکاران (۳)، و ۵) محلول غذایی رواکورا [به نقل از اسمیت و همکاران (۳۴)]. لازم به ذکر است که این محلول‌های غذایی در تمام و یا بخشی از دوره رشد ذرت در کشت بدون خاک مورد استفاده قرار گرفته‌اند. فرمولاسیون محلول‌های غذایی مورد استفاده در جداول (۱) و (۲) ارائه شده است. عامل دوم نیز شامل دو رقم ذرت هیبرید سینگل‌کراس ۷۰۴ و سینگل‌کراس ۴۱۰ بود که جزو ارقام متداول کشت‌های خاکی ایران هستند. به‌منظور اجرای آزمایش، بذور ذرت پس از ضدعفونی توسط محلول هیپوکلریت سدیم یک درصد به مدت یک ساعت (۵) در سینی کشت نشا حاوی کوکوپیت و پرلیت (با نسبت ۲ به ۱ حجمی) کاشته شدند و روزانه توسط آب مقطر آبیاری شدند.

پس از سبزشدن بذور و ظهور دو برگ اولیه، نشاهای ذرت به گلدان‌های پلاستیکی ۱۰ لیتری حاوی پرلیت (۰/۵تا ۵ میلی-متر) منتقل شدند. برای هر واحد آزمایشی یک گلدان در نظر گرفته شده و در هر گلدان یک بوته کشت شد. گلدان‌ها با تراکم ۹ بوته بر مترمربع (۳) در گلخانه چیده شدند. برای تهیه محلول‌های غذایی، از آب مقطر استفاده شد. پس از انتقال نشاهای ذرت به گلدان‌ها از محلول‌های غذایی یک چهارم قدرت استفاده شد که به‌تدریج و با افزایش رشد گیاه و پس از ۲۱ روز و در مرحله ۴ تا ۵ برگی از محلول غذایی تمام قدرت استفاده شد. محلول غذایی روزانه به‌صورت دستی به گیاهان داده شد. نوع سامانه آب‌کشت مورد استفاده از نوع باز و کسر آبشویی بسته به مرحله رشد گیاه بین ۵ تا ۲۰ درصد درنظر گرفته شد تا از تجمع نمک‌ها در بستر جلوگیری شود. سپس، مراقبت‌های زراعی معمول در حین دوره داشت در گلخانه صورت گرفت. در طول دوره آزمایش، حداکثر دمای روز گلخانه ۲۵ درجه سلسیوس و حداقل دمای شب ۱۵ درجه سلسیوس، رطوبت نسبی ۲۰ تا ۴۰ درصد (رطوبت نسبی

1. Half strength

**جدول ۱.** غلظت عناصر غذایی پرمصرف، pH و رسانایی الکتریکی (EC) در محلول‌های غذایی مورد استفاده برای ذرت.

**Table 1.** The concentrations of macronutrients, pH and electrical conductivity (EC) in nutrient solutions used for maize.

| EC | pH | گوگرد S | منیزیم Mg | کلسیم Ca | پتاسیم K | فسفر P | نیتروژن آمونیومی $N\text{-}NH_4^+$ | نیتروژن نیتراتی $N\text{-}NO_3^-$ | نیتروژن کل N-total | محلول غذایی Nutrient solution |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ($dS\ m^{-1}$) | | | | | | ($mmol\ L^{-1}$) | | | | |
| 1.75 | 6 | 2 | 2 | 5 | 6 | 1 | 0 | 15 | 15 | $S_1$ |
| 0.92 | 6 | 1 | 1 | 2.5 | 3 | 0.5 | 0 | 7.5 | 7.5 | $S_2$ |
| 1.39 | 7.3 | 1.7 | 2.5 | 1.7 | 5 | 1 | 2.74 | 6.25 | 8.99 | $S_3$ |
| 1.32 | 7 | 1.6 | 1.6 | 2.5 | 6.6 | 1 | 0.4 | 8.6 | 9 | $S_4$ |
| 1.67 | 6 | 1.87 | 0.86 | 3.17 | 6.09 | 1.29 | 4.71 | 14.14 | 18.85 | $S_5$ |

$S_1$: تمام قدرت هوگلند و آرنون، $S_2$: نیم‌قدرت هوگلند و آرنون، $S_3$: باری و میلر، $S_4$: الکساندر و همکاران، $S_5$: روآکورا.

$S_1$: Full strength Hoagland's and Arnon, $S_2$: Half strength Hoagland's and Arnon, $S_3$: Barry and Miller, $S_4$: Alexander et al., $S_5$: Ruakura.

**جدول ۲.** غلظت عناصر غذایی کم‌مصرف در محلول‌های غذایی مورد استفاده برای ذرت.

**Table 2.** The concentrations of micronutrients in nutrient solutions used for maize.

| کلر Cl | سدیم Na | بر B | مولیبدن Mo | مس Cu | روی Zn | منگنز Mn | آهن Fe | محلول غذایی Nutrient solution |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | ($\mu mol\ L^{-1}$) | | | | | |
| 20 | 0.22 | 46.3 | 0.11 | 0.32 | 0.77 | 9.15 | 40 | $S_1$ |
| 10 | 0.11 | 23.15 | 0.05 | 0.16 | 0.38 | 4.57 | 20 | $S_2$ |
| 500 | - | 26 | 0.08 | 10 | 25 | 31 | 17 | $S_3$ |
| 510 | - | 13.7 | 0.07 | 9 | 22.9 | 29.2 | 14.3 | $S_4$ |
| 250 | 650 | 46.3 | 0.1 | 0.6 | 3.8 | 9.1 | 53.7 | $S_5$ |

$S_1$: تمام قدرت هوگلند و آرنون، $S_2$: نیم‌قدرت هوگلند و آرنون، $S_3$: باری و میلر، $S_4$: الکساندر و همکاران، $S_5$: روآکورا.

$S_1$: Full strength Hoagland's and Arnon, $S_2$: Half strength Hoagland's and Arnon, $S_3$: Barry and Miller, $S_4$: Alexander et al., $S_5$: Ruakura.

کم به‌دلیل خنک بودن هوای گلخانه و عدم نیاز به فعال بودن سامانه فن و پد گلخانه در طول آزمایش بود) و میزان نور ۲۵۳۰۰ تا ۶۲۳۰۰ لوکس بود. یک ماه پس از کاشت نشاهای ذرت، با مشاهده نوارهای زرد در طرفین رگبرگ اصلی برگ در هر دو رقم ذرت در تمامی تیمارهای آزمایشی به دلیل کمبود آهن، غلظت آهن در محلول‌ها به‌تدریج به ۱/۵ تا ۲ برابر از منبع سکوسترین آهن ۱۳۸ افزایش داده شد تا اینکه به‌طور کلی کمبود آهن در ارقام ذرت برطرف گردید. در مرحله پایان ظهور گل آذین نر ارتفاع گیاه تا انتهای آخرین برگ با استفاده از متر، قطر ساقه با کولیس رقومی (با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر) در محل طوقه و شاخص سبزینگی برگ با کلروفیل‌متر دستی (Hansatech مدل CL-01) با انجام ۲۰ قرائت از پهنک برگ دهم اندازه‌گیری شد. همچنین سطح برگ در هر گیاه پس از اندازه‌گیری طول و عرض برگ‌ها با متر، بر اساس رابطه ارائه-شده توسط دیر و همکاران (۱۲) اندازه‌گیری شد. در پایان مرحله ظهور گل آذین نر، گیاهان برداشت شدند. پس از برداشت، قسمت‌های ریشه، ساقه و برگ تفکیک شده و وزن تازه نمونه‌ها توسط ترازوی رقومی اندازه‌گیری شد. نمونه‌ها

توسط آب معمولی و آب مقطر شسته شده و به مدت ۷۲ ساعت در آون در دمای ۷۰ درجه سلسیوس قرار داده شدند تا خشک شوند. سپس وزن خشک نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. به دنبال آن نمونه‌ها برای اندازه‌گیری‌های شیمیایی با استفاده از آسیاب برقی پودر شدند. غلظت نیتروژن در نمونه‌های گیاهی با استفاده از روش کلدال (۱۷)، غلظت فسفر با روش فسفو وانادات مولیبدات زرد و با دستگاه اسپکتروفتومتر ( Cintra Model 101) و پتاسیم با دستگاه فلیم‌فتومتر ( Corning Model 410) اندازه‌گیری شد (۱۷). همچنین کارایی مصرف آب نیز از تقسیم وزن خشک شاخساره علوفه تولیدشده بر حجم محلول غذایی مصرف‌شده محاسبه شد (۲۸). تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS انجام شده و مقایسه میانگین‌ها با آزمون چند دامنه‌ای دانکن و ضرایب همبستگی پیرسون به‌منظور بررسی وجود یا عدم وجود همبستگی بین صفات اندازه‌گیری‌شده با استفاده از نرم‌افزار SAS انجام شد.

## نتایج و بحث

### تأثیر محلول‌های غذایی و ارقام ذرت بر غلظت نیتروژن، فسفر و پتاسیم گیاه

نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثر برهمکنش محلول غذایی با رقم بر غلظت نیتروژن برگ و ساقه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. درحالی‌که غلظت نیتروژن ریشه تنها تحت تأثیر اثر اصلی محلول غذایی در سطح احتمال یک درصد قرار گرفت (جدول ۳). بیش‌ترین غلظت نیتروژن برگ (۳۱/۵۵ گرم بر کیلوگرم) در گیاهان تغذیه‌شده با محلول غذایی رواکورا در رقم سینگل‌کراس ۷۰۴ مشاهده شد. غلظت نیتروژن برگ در گیاهان تغذیه‌شده با این محلول به‌ترتیب ۴۸/۸۲، ۴۱/۷۳، ۳۸/۲۶ و ۲۲/۴۸ درصد بیش‌تر از محلول‌های نیم‌قدرت هوگلند و آرنون، باری و میلر، الکساندر و همکاران و تمام قدرت هوگلند و آرنون در همین رقم بود (جدول ۴). در رقم سینگل‌کراس ۴۱۰ نیز بیش‌ترین غلظت نیتروژن برگ در گیاهان تغذیه‌شده با محلول غذایی رواکورا به‌دست آمد. بیش‌ترین غلظت نیتروژن ساقه در هر دو رقم سینگل‌کراس ۷۰۴ (۲۱/۷۰ گرم بر کیلوگرم) و سینگل‌کراس ۴۱۰ (۱۵/۶۱ گرم بر کیلوگرم) در گیاهان تغذیه‌شده با محلول غذایی رواکورا مشاهده شد. کم‌ترین غلظت نیتروژن برگ و ساقه هم در گیاهان تغذیه‌شده با محلول غذایی نیم‌قدرت هوگلند و آرنون دیده شد (جدول ۴). غلظت نیتروژن ریشه نیز، روندی مشابه غلظت آن در برگ و ساقه داشت و در گیاهان تغذیه‌شده با محلول غذایی رواکورا به بیش‌ترین میزان رسید (جدول ۵). دلیل این افزایش را می‌توان به بیش‌تر بودن غلظت نیتروژن کل و همچنین تأمین بخشی از نیتروژن به شکل آمونیوم در محلول غذایی رواکورا نسبت به محلول‌های غذایی دیگر ارتباط داد. بر مبنای نتایج جدول (۱)، غلظت نیتروژن در محلول غذایی رواکورا (۱۸/۸۵ میلی‌مول بر لیتر) از سایر محلول‌های غذایی بیش‌تر بود. از طرف دیگر کاربرد نیترات به همراه آمونیوم در محلول غذایی رواکورا می‌تواند بر افزایش غلظت نیتروژن در برگ، ساقه و ریشه ذرت مؤثر باشد. دلایل این افزایش عبارتند از: جذب و ساخت (آسیمیلاسیون)[1] یون‌های آمونیوم در مقایسه با نیترات به دلیل مصرف کم‌تر انرژی توسط گیاه سریع‌تر است. آسیمیلاسیون یک مول نیترات، ۱۵ مول ATP نیاز دارد درحالی‌که یک مول آمونیوم برای آسیمیلاسیون به ۵ مول ATP نیاز دارد. همچنین حدود ۲۳ درصد از انرژی حاصل از تنفس برای آسیمیلاسیون نیترات در ریشه‌ها مصرف می‌شود درحالی‌که این مقدار برای آمونیوم ۱۴ درصد است. بنابراین تغذیه آمونیومی منجر به صرفه‌جویی انرژی برای گیاه می‌شود (۲۰ و ۳۰). از طرف دیگر جذب آمونیوم محیط ریشه را اسیدی کرده و بنابراین جذب نیترات را از طریق انتقال همزمان پروتون/نیترات تسهیل می‌کند (۲۲). در راستای نتایج این پژوهش، اسمیت و همکاران (۳۴) با بررسی اثر هشت محلول غذایی مختلف بر غلظت نیتروژن در گیاهان ذرت، شبدر سفید و رای‌گراس بیان کردند که بیش‌ترین غلظت نیتروژن در ریشه و شاخساره گیاهان تغذیه‌شده با محلول غذایی بولارد و میدلتون

1. Assimilation

**جدول ۳.** تجزیه واریانس غلظت‌های نیتروژن، فسفر و پتاسیم در برگ، ساقه و ریشه ذرت تحت تأثیر محلول غذایی و نوع رقم.

**Table 3.** Analysis of variance for nitrogen, phosphorus and potassium concentrations in leaf, stem and root of maize affected by nutrient solution and cultivar type.

| میانگین مربعات (Mean squares) | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| منابع تغییر S.O.V | درجه آزادی Degree of freedom | غلظت نیتروژن برگ Leaf nitrogen concentration | غلظت نیتروژن ساقه Stem nitrogen concentration | غلظت نیتروژن ریشه Root nitrogen concentration | غلظت فسفر برگ Leaf phosphorus concentration | غلظت فسفر ساقه Stem phosphorus concentration | غلظت فسفر ریشه Root phosphorus concentration | غلظت پتاسیم برگ Leaf potassium concentration | غلظت پتاسیم ساقه Stem potassium concentration | غلظت پتاسیم ریشه Root potassium concentration |
| بلوک Block | 3 | 0.99 ns | 0.41 ns | 0.58 ns | 0.07 ns | 0.44 ns | 0.09 ns | 13.12ns | 0.92 ns | 0.51 ns |
| محلول غذایی Nutrient solution | 4 | 89.85** | 99.48** | 64.04** | 9.92** | 92.22** | 212.09** | 376.28** | 102.41** | 241.44 ** |
| رقم Cultivar | 1 | 1.06 ns | 21.22** | 5.00 ns | 0.13 ns | 0.84 ns | 0.22 ns | 194.87** | 7.14 ns | 42.93 ** |
| محلول غذایی × رقم Nutrient solution × Cultivar | 4 | 20.79** | 25.63** | 0.43 ns | 0.82** | 2.32** | 0.42** | 19.34 ns | 5.47 ns | 1.65 ns |
| خطا Error | 27 | 1.20 | 0.43 | 0.82 | 0.06 | 0.37 | 0.07 | 7.93 | 2.64 | 1.64 |
| ضریب تغییرات (٪) Coefficient of variation (%) | – | 4.40 | 5.08 | 8.24 | 7.27 | 7.95 | 2.86 | 8.58 | 6.35 | 6.50 |

ns غیرمعنی‌دار، ** معنی‌دار در سطح یک درصد

ns Non significant, ** Significant at 1%

**جدول ۴.** مقایسه میانگین اثر برهمکنش محلول غذایی و رقم ذرت بر غلظت نیتروژن و فسفر در برگ، ساقه و ریشه.

**Table 4.** Mean comparisons of the nutrient solution and maize cultivar interaction effect on nitrogen and phosphorus concentrations in the leaf, stem and root.

| غلظت فسفر ریشه (گرم بر کیلوگرم) Root phosphorus concentration ($g\ kg^{-1}$) | غلظت فسفر ساقه (گرم بر کیلوگرم) Stem phosphorus concentration ($g\ kg^{-1}$) | غلظت فسفر برگ (گرم بر کیلوگرم) Leaf phosphorus concentration ($g\ kg^{-1}$) | غلظت نیتروژن ساقه (گرم بر کیلوگرم) Stem nitrogen concentration ($g\ kg^{-1}$) | غلظت نیتروژن برگ (گرم بر کیلوگرم) Leaf nitrogen concentration ($g\ kg^{-1}$) | محلول غذایی Nutrient solution | رقم Cultivar |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $5.56^{e}$ | $5.30^{e}$ | $2.82^{d}$ | $16.38^{b}$ | $25.76^{c}$ | $S_1$ | Single cross 704 |
| $4.93^{f}$ | $4.05^{f}$ | $1.88^{f}$ | $9.17^{g}$ | $21.20^{e}$ | $S_2$ | |
| $14.62^{b}$ | $9.81^{b}$ | $4.51^{b}$ | $10.85^{def}$ | $22.26^{de}$ | $S_3$ | |
| $7.50^{d}$ | $6.21^{d}$ | $3.56^{c}$ | $10.50^{f}$ | $22.82^{d}$ | $S_4$ | |
| $15.79^{a}$ | $12.03^{a}$ | $4.64^{b}$ | $21.70^{a}$ | $31.55^{a}$ | $S_5$ | |
| $5.54^{e}$ | $5.80^{de}$ | $2.70^{de}$ | $11.83^{c}$ | $28.00^{b}$ | $S_1$ | Single cross 410 |
| $4.40^{g}$ | $3.06^{g}$ | $2.35^{e}$ | $10.57^{ef}$ | $21.84^{de}$ | $S_2$ | |
| $13.90^{c}$ | $9.52^{b}$ | $3.72^{c}$ | $11.55^{cde}$ | $26.53^{bc}$ | $S_3$ | |
| $7.80^{d}$ | $8.11^{c}$ | $2.84^{d}$ | $11.76^{cd}$ | $21.35^{de}$ | $S_4$ | |
| $16.03^{a}$ | $12.36^{a}$ | $5.22^{a}$ | $15.61^{b}$ | $27.51^{b}$ | $S_5$ | |

در هر ستون، حروف مشابه نمایانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد براساس آزمون دانکن هستند.

Means followed by the same letters in each column are not significantly different at 5% probability level based on Duncan test.

$S_1$: تمام قدرت هوگلند و آرنون، $S_2$: نیم‌قدرت هوگلند و آرنون، $S_3$: باری و میلر، $S_4$: الکساندر و همکاران، $S_5$: رواکورا

$S_1$: Full strength Hoagland's and Arnon, $S_2$: Half strength Hoagland's and Arnon, $S_3$: Barry and Miller, $S_4$: Alexander et al., $S_5$: Ruakura.

**جدول ۵.** مقایسه میانگین اثر محلول غذایی بر غلظت نیتروژن ریشه، و غلظت پتاسیم در برگ، ساقه و ریشه ذرت

**Table 5.** Mean comparisons of the effect of nutrient solution on root nitrogen concentration, and potassium concentrations in leaf, stem and root of maize.

| محلول غذایی Nutrient solution | غلظت نیتروژن ریشه (گرم بر کیلوگرم) Root nitrogen concentration ($g\ kg^{-1}$) | غلظت پتاسیم برگ (گرم بر کیلوگرم) Leaf potassium concentration ($g\ kg^{-1}$) | غلظت پتاسیم ساقه (گرم بر کیلوگرم) Stem potassium concentration ($g\ kg^{-1}$) | غلظت پتاسیم ریشه (گرم بر کیلوگرم) Root potassium concentration ($g\ kg^{-1}$) |
|---|---|---|---|---|
| $S_1$ | $13.58^b$ | $30.34^c$ | $19.32^c$ | $28.25^a$ |
| $S_2$ | $6.81^e$ | $24.57^d$ | $11.53^d$ | $20.05^c$ |
| $S_3$ | $11.20^c$ | $29.62^c$ | $18.16^c$ | $23.93^b$ |
| $S_4$ | $10.19^d$ | $41.69^a$ | $25.50^a$ | $28.16^a$ |
| $S_5$ | $14.53^a$ | $37.82^b$ | $23.92^b$ | $27.61^a$ |

در هر ستون، حروف مشابه نمایانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد براساس آزمون دانکن هستند.

Means followed by the same letters in each column are not significantly different at 5% probability level based on Duncan test.

$S_1$: هوگلند و آرنون کامل، $S_2$: هوگلند و آرنون نیم‌قدرت، $S_3$: باری و میلر، $S_4$: الکساندر و همکاران، $S_5$: رواکورا

$S_1$: Full strength Hoagland's and Arnon, $S_2$: Half strength Hoagland's and Arnon, $S_3$: Barry and Miller, $S_4$: Alexander et al., $S_5$: Ruakura.

ثبت شد. آن‌ها گزارش کردند دلیل این افزایش آن است که این دو محلول هم دارای دو شکل نیتروژن(نیترات و آمونیوم) در ترکیب خود بودند و هم غلظت نیتروژن در آن‌ها از بقیه محلول‌ها بیش‌تر بود. همچنین کم‌ترین غلظت نیتروژن در گیاهان تغذیه‌شده با محلول‌های غذایی رابینز و اشتاینر مشاهده شد. این دو محلول در ترکیب خود تنها یک شکل نیتروژن (نیترات) داشته و غلظت نیتروژن آن‌ها از دیگر محلول‌های غذایی کم‌تر بود. برمبنای نتایج این پژوهش، اگرچه محلول‌های باری و میلر و الکساندر و همکاران در ترکیب خود دارای دو شکل نیتروژن بودند اما غلظت نیتروژن کل در آن‌ها کم‌تر از محلول غذایی رواکورا بوده (جدول ۱) و در نتیجه غلظت نیتروژن در گیاهان تغذیه‌شده با این محلول‌های غذایی از گیاهان تغذیه‌شده با محلول غذایی روآکورا کم‌تر بود (جدول ۴). مشابه نتایج این پژوهش، فالو و همکاران (۱۳) نشان دادند در کشت بدون خاک کاهو، تغذیه گیاهان با محلول‌های غذایی که دارای غلظت بیش‌تری از نیتروژن بودند، سبب افزایش معنی‌دار غلظت نیتروژن شاخساره گیاه شد. همچنین کیانی (۱۹) با بررسی تأثیر پنج محلول غذایی مختلف برای پرورش کاهو در شرایط کشت بدون خاک عنوان کرد بیش‌ترین غلظت نیتروژن در شاخساره گیاهان تغذیه‌شده با محلول غذایی مرکز پژوهش‌های باغبانی و سبزی‌های گلخانه‌ای هلند مشاهده شد که دلیل آن غلظت بیش‌تر نیتروژن در این محلول غذایی نسبت به سایر محلول‌های غذایی بود. نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثر اصلی محلول غذایی و برهم‌کنش محلول غذایی با رقم بر غلظت فسفر در برگ، ساقه و ریشه ذرت در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). در هر دو رقم ذرت، بیش‌ترین غلظت فسفر برگ در گیاهان تغذیه‌شده با محلول غذایی رواکورا مشاهده شد که البته اختلاف معنی‌داری با همدیگر در سطح ۵ درصد آماری داشتند (جدول ۴). اگرچه در رقم سینگل‌کراس ۷۰۴ بین دو محلول غذایی رواکورا و باری و میلر تفاوت معنی‌داری از نظر غلظت فسفر برگ مشاهده نشد (جدول ۴). همچنین در هر دو رقم ذرت بیش‌ترین و کم‌ترین غلظت‌های فسفر در ساقه و ریشه گیاه به‌ترتیب در گیاهان تغذیه‌شده با محلول غذایی رواکورا و محلول نیم‌قدرت هوگلند

و آرنون مشاهده شد. در هر دو رقم ذرت، پس از محلول غذایی رواکورا تغذیه گیاهان با محلول غذایی باری و میلر منجر به بیش‌ترین غلظت فسفر در ساقه و ریشه شد (جدول ۴). افزایش معنی‌دار غلظت فسفر در شاخساره و ریشه ارقام ذرت تغذیه‌شده با محلول غذایی روآکورا را می‌توان به غلظت بیش‌تر فسفر آن (۱/۲۹ میلی‌مول بر لیتر) و وجود آمونیوم در ترکیب این محلول غذایی نسبت داد (جدول ۱). رابطه هم‌افزایی[1] بین آمونیوم و فسفر دلیل احتمالی افزایش غلظت فسفر در شاخساره و ریشه ارقام ذرت تغذیه‌شده با محلول غذایی مذکور است (۲۰). در این راستا ژانگ و همکاران (۴۲) گزارش کردند تغذیه آمونیومی با ایجاد توازن در بارهای مثبت و منفی سلولی می‌تواند در افزایش غلظت فسفر گیاه مؤثر باشد. مودی و همکاران (۲۴) گزارش کردند که آمونیوم جذب کاتیون‌ها را کاهش داده و بالعکس جذب آنیون‌ها از جمله فسفر را افزایش می‌دهد. بلو و همکاران (۷) گزارش کردند که با افزایش آمونیوم در محلول غذایی، جذب فسفر توسط ذرت در شرایط کشت بدون خاک افزایش یافت. کاهش معنی‌دار غلظت فسفر در تمامی بخش‌های گیاه (برگ، ساقه و ریشه) در هر دو رقم ذرت تغذیه‌شده با محلول غذایی نیم‌قدرت هوگلند و آرنون (جدول ۴) را می‌توان به غلظت کم فسفر آن در مقایسه با دیگر محلول‌های غذایی و همچنین نبود آمونیوم در ترکیب غذایی آن نسبت داد (جدول ۱). تأثیر مقدار فسفر محلول غذایی بر غلظت فسفر گیاه در پژوهش اسمیت و همکاران (۳۴) نیز مشاهده شده است. آن‌ها در بررسی اثر محلول‌های غذایی متفاوت بر غلظت فسفر در ذرت، شبدر سفید و رای‌گراس گزارش کردند گیاهان تغذیه‌شده با محلول میدلتون دارای بیش‌ترین غلظت فسفر در شاخساره و ریشه بودند درحالی‌که گیاهان تغذیه‌شده با محلول غذایی اشتاینر علائم کمبود فسفر را نشان دادند. آن‌ها گزارش کردند غلظت فسفر در محلول میدلتون نسبتاً زیاد (۶۵ میلی‌گرم بر لیتر) و در محلول اشتاینر نسبتاً کم (۰/۸ میلی‌گرم بر لیتر) بود. نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثر اصلی محلول غذایی بر غلظت پتاسیم در برگ، ساقه و ریشه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود درحالی‌که اثر رقم ذرت تنها بر غلظت پتاسیم برگ و ریشه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۳).

بیش‌ترین غلظت پتاسیم در برگ و ساقه در گیاهان تغذیه‌شده با محلول غذایی الکساندر و همکاران مشاهده شد و محلول‌های غذایی رواکورا، تمام قدرت هوگلند و آرنون و باری و میلر در مراتب بعدی قرار داشتند، اگرچه اختلاف معنی‌داری بین دو محلول غذایی تمام قدرت هوگلند و آرنون و باری و میلر از لحاظ غلظت پتاسیم برگ و ساقه دیده نشد (جدول ۵). احتمالاً بیش‌تر بودن غلظت پتاسیم در محلول غذایی الکساندر و همکاران (۶/۶ میلی‌مول بر لیتر) نسبت به دیگر محلول‌های غذایی سبب افزایش غلظت پتاسیم در برگ و ساقه گیاهان ذرت تغذیه‌شده با این محلول غذایی شده است (جدول ۱). تغییرات غلظت پتاسیم در ریشه تا حدودی متفاوت بود. بیش‌ترین غلظت پتاسیم در گیاهان تغذیه‌شده با محلول غذایی تمام قدرت هوگلند و آرنون دیده شد. اگرچه تفاوت معنی‌داری بین محلول‌های تمام قدرت هوگلند و آرنون، الکساندر و همکاران و رواکورا از لحاظ غلظت پتاسیم ریشه مشاهده نشد. کم‌ترین غلظت پتاسیم هم در تمامی بخش‌های گیاه در گیاهان تغذیه‌شده با محلول غذایی نیم‌قدرت هوگلند و آرنون به ثبت رسید (جدول ۵). هماهنگ با نتایج این پژوهش، کلیک و همکاران (۹) گزارش کردند با افزایش غلظت پتاسیم در محلول غذایی، غلظت پتاسیم توسط برگ و ریشه ذرت در شرایط آب‌کشت افزایش معنی‌دار نشان داد. نتایج نشان داد غلظت پتاسیم در ریشه و برگ به‌طور معنی‌داری در رقم سینگل‌کراس ۴۱۰ بیش از رقم سینگل‌کراس ۷۰۴ بود (جدول ۶). این اختلاف معنی‌دار به دلیل تفاوت نوع رقم ناشی از تفاوت‌های ژنتیکی ارقام گیاهی در پاسخ به محلول‌های غذایی مورد استفاده است. جانگ سولی و همکاران (۱۸) اثر ۴ محلول غذایی با مقادیر متفاوت عناصر پرمصرف و کلسیم و منیزیم را بر غلظت پتاسیم دو رقم کاهو *Geockchima* و *Cheongchima*

1. Synergism

**جدول ۶.** مقایسه میانگین اثر رقم ذرت بر غلظت پتاسیم در ریشه و برگ.

**Table 6.** Mean comparisons of the effect of maize cultivar on the root and leaf potassium concentrations.

| رقم ذرت<br>Maize cultivar | غلظت پتاسیم برگ<br>(گرم بر کیلوگرم)<br>Leaf potassium concentration<br>($g\ kg^{-1}$) | غلظت پتاسیم ریشه<br>(گرم بر کیلوگرم)<br>Root potassium concentration<br>($g\ kg^{-1}$) |
|---|---|---|
| سینگل‌کراس ۷۰۴<br>Single cross 704 | 30.60[b] | 18.65[b] |
| سینگل‌کراس ۴۱۰<br>Single cross 410 | 35.01[a] | 20.72[a] |

در هر ستون، حروف متفاوت نمایانگر اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد براساس آزمون دانکن است.

Means followed by different letters in each column are significantly different at 5% probability level based on Duncan test

بررسی کردند. آن‌ها گزارش کردند غلظت پتاسیم در برگ‌های کاهو رقم *Geockchima* به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از رقم *Cheongchima* بود. آن‌ها دلیل این یافته را تفاوت ژنتیکی دو رقم بیان کردند.

## تأثیر محلول‌های غذایی و رقم ذرت بر ارتفاع، قطر، سطح برگ و شاخص سبزینگی برگ

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که قطر ساقه، ارتفاع بوته و سطح برگ تنها تحت تأثیر آثار اصلی محلول غذایی و رقم و شاخص سبزینگی برگ هم صرفاً تحت تأثیر اثر اصلی محلول غذایی (هر دو در سطح احتمال یک درصد) قرار گرفتند (جدول ۷). نتایج نشان داد بیش‌ترین ارتفاع بوته در گیاهان تغذیه‌شده با محلول غذایی رواکورا (۲۵۹/۲۵ سانتی‌متر) ثبت شد که اختلاف معنی‌داری با محلول‌های غذایی تمام قدرت هوگلند و آرنون، باری و میلر و الکساندر و همکاران نداشت. کم‌ترین ارتفاع هم در گیاهان تغذیه‌شده با محلول غذایی نیم-قدرت هوگلند (۲۱۹/۵۰ سانتی‌متر) مشاهده شد (جدول ۸). به‌طور مشابه بیش‌ترین قطر ساقه (۳۰/۹۰ میلی‌متر) در گیاهان تغذیه‌شده با محلول غذایی رواکورا دیده شد. همچنین قطر ساقه بین گیاهان تغذیه‌شده با محلول‌های تمام قدرت هوگلند و آرنون، باری و میلر و الکساندر و همکاران تفاوت معنی‌داری نداشت. بیش‌ترین و کم‌ترین مقادیر سطح برگ به‌ترتیب در گیاهان تغذیه‌شده با محلول غذایی رواکورا (۰/۸۴ مترمربع بر بوته) و محلول غذایی نیم‌قدرت هوگلند و آرنون (۰/۵۷ مترمربع بر بوته) مشاهده شد که با هم اختلاف معنی‌دار داشتند (جدول ۸). به توجه به جدول (۸)، بیش‌ترین و کم‌ترین مقادیر شاخص سبزینگی برگ به‌ترتیب در گیاهان تغذیه‌شده با محلول غذایی رواکورا و نیم‌قدرت هوگلند و آرنون مشاهده شد. به‌طوری‌که این شاخص در گیاهان تغذیه‌شده با محلول غذایی رواکورا ۲/۰۴ برابر گیاهان تغذیه‌شده با محلول غذایی نیم‌قدرت هوگلند و آرنون بود. افزایش شاخص‌های رشد رویشی مانند ارتفاع بوته، قطر ساقه، سطح برگ و شاخص سبزینگی برگ در گیاهان تغذیه‌شده با محلول غذایی رواکورا را می‌توان به ترکیب یونی این محلول غذایی (جدول ۱) و تغذیه بهینه عناصر غذایی مانند نیتروژن، فسفر و پتاسیم (جداول ۴ و ۵) نسبت داد. وجود همبستگی مثبت و معنی‌دار بین غلظت نیتروژن در شاخساره با سطح برگ ($r$ = ۰/۶۶ ،$p$ < ۰/۰۱) و شاخص سبزینگی برگ ($r$ = ۰/۷۰ ،$p$ < ۰/۰۱)، و همچنین بین غلظت فسفر در شاخساره با سطح برگ ($r$ = ۰/۷۶ ،$p$ < ۰/۰۱) و شاخص سبزینگی برگ ($r$ = ۰/۸۱ ،$p$ < ۰/۰۱) نشان‌دهنده تأثیر مثبت

**جدول ۷.** تجزیه واریانس ارتفاع گیاه، قطر ساقه، سطح برگ، شاخص سبزینگی برگ، وزن تازه و خشک شاخساره و ریشه، و کارایی مصرف آب ذرت تحت تأثیر محلول غذایی و نوع رقم.

**Table 7.** Analysis of variance of plant height, stem diameter, leaf area, leaf greenness index, fresh and dry weights of shoot and root, and water use efficiency of maize as affected by nutrient solution and cultivar type.

| میانگین مربعات (Mean squares) | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| منابع تغییر S.O.V | درجه آزادی Degree of freedom | ارتفاع گیاه Plant height | قطر ساقه Stem diameter | سطح برگ Leaf area | شاخص میزان سبزینگی برگ Leaf greenness index | وزن تازه شاخساره (برگ+ ساقه) Shoot fresh weight (leaf+stem) | وزن تازه ریشه Root fresh weight | وزن خشک شاخساره (برگ + ساقه) Shoot dry weight (leaf+stem) | وزن خشک ریشه Root dry weight | کارایی مصرف آب Water use efficiency |
| بلوک Block | 3 | 483.92 ns | 204.06** | 0.00 ns | 48.13** | 2733ns | 1466ns | 68.25 ns | 29.62 ns | 0.1ns |
| محلول غذایی Nutrient solution | 4 | 1963** | 33.92** | 0.08** | 494.02** | 255998** | 149316** | 6407** | 1706** | 6.33** |
| رقم Cultivar | 1 | 1939** | 96.92** | 0.07** | 0.1ns | 109830** | 64400** | 808.74** | 1518** | 1.29** |
| محلول غذایی × رقم Nutrient solution × Cultivar | 4 | 86.86 ns | 1.26 ns | 0.00 ns | 19.26 ns | 10211** | 6003** | 112.37* | 112.15** | 0.17* |
| خطا Error | 27 | 236.78 | 4.44 | 0.00 | 5.91 | 1577 | 471.88 | 32.65 | 12.11 | 0.05 |
| ضریب تغییرات (٪) Coefficient of variation (%) | | 6.27 | 7.52 | 6.08 | 8.84 | 4.75 | 5.70 | 4.22 | 9.46 | 4.30 |

ns غیرمعنی‌دار، * معنی‌دار در سطح ۵ درصد، ** معنی‌دار در سطح یک درصد

ns Non significant, * Significant at 5%, ** Significant at 1%

**جدول ۸.** مقایسه میانگین اثر محلول غذایی بر ارتفاع گیاه، قطر ساقه، سطح برگ و شاخص سبزینگی برگ در ذرت.

**Table 8.** Mean comparisons of the effect of nutrient solution on plant height, stem diameter, leaf area and leaf greenness index in maize.

| محلول غذایی Nutrient solution | ارتفاع گیاه (سانتی‌متر) Plant height (cm) | قطر ساقه (میلی‌متر) Stem diameter (mm) | سطح برگ (مترمربع بر بوته) Leaf area ($m^2$ $plant^{-1}$) | شاخص سبزینگی برگ Leaf greenness index |
|---|---|---|---|---|
| $S_1$ | $245.50^a$ | $27.71^b$ | $0.63^c$ | $26.37^c$ |
| $S_2$ | $219.50^b$ | $25.19^c$ | $0.57^d$ | $19.38^e$ |
| $S_3$ | $256.31^a$ | $28.65^b$ | $0.73^b$ | $29.72^b$ |
| $S_4$ | $245.75^a$ | $27.63^b$ | $0.70^b$ | $22.33^d$ |
| $S_5$ | $259.25^a$ | $30.90^a$ | $0.84^a$ | $39.67^a$ |

در هر ستون، حروف مشابه نمایانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد براساس آزمون دانکن هستند.

Means followed by the same letters in each column are not significantly different at 5% probability level based on Duncan test.

$S_1$: تمام قدرت هوگلند و آرنون، $S_2$: نیم‌قدرت هوگلند و آرنون، $S_3$: باری و میلر، $S_4$: الکساندر و همکاران، $S_5$: رواکورا

$S_1$: Full strength Hoagland's and Arnon, $S_2$: Half strength Hoagland's and Arnon, $S_3$: Barry and Miller, $S_4$: Alexander et al., $S_5$: Ruakura.

این عناصر بر شاخص‌های رشد رویشی ذرت علوفه‌ای است (جدول ۹). شاخص سبزینگی برگ بستگی زیادی به غلظت نیتروژن گیاه دارد. کمبود نیتروژن در محلول‌های غذایی سبب پیری زودرس برگ‌ها و به‌دنبال آن کاهش شاخص سبزینگی برگ می‌شود (۸). هماهنگ با نتایج این پژوهش، سریاگتولا و همکاران (۳۵) عنوان کردند افزایش غلظت عناصر (پرمصرف و کم‌مصرف) در یک محلول غذایی با نام تجاری (AB Mix) از صفر به ۵ میلی‌مولار منجر به ثبت بیش‌ترین ارتفاع سورگوم علوفه‌ای در کشت بدون خاک شد. همچنین گلدانی و همکاران (۱۴) با بررسی اثر ۸ نوع محلول غذایی بر رشد دو رقم ذرت در شرایط بدون خاک گزارش کردند بیش‌ترین سطح برگ در رقم KWS2360 تغذیه‌شده با محلول غذایی حاوی NPK و کم‌ترین سطح برگ در رقم *Ressuda Pionee* تغذیه‌شده با محلول غذایی بدون نیتروژن و پتاسیم حاصل شد. همچنین بیش‌ترین و کم‌ترین مقادیر شاخص سبزینگی برگ ذرت به‌ترتیب در محلول غذایی حاوی NPK و محلول غذایی بدون نیتروژن به ثبت رسید. کلیک و همکاران (۹) گزارش کردند بیش‌ترین شاخص سبزینگی برگ در گیاهان تغذیه‌شده با محلول غذایی حاوی ۶ میلی‌مولار پتاسیم و ۹۰ میکرومولار آهن دیده شد و مصرف محلول‌های غذایی حاوی غلظت‌های بیش‌تر پتاسیم و آهن، منجر به کاهش میزان شاخص سبزینگی برگ ذرت شد. نتایج نشان داد بین دو رقم سینگل‌کراس ۷۰۴ و سینگل‌کراس ۴۱۰ اختلاف معنی‌داری از نظر ارتفاع گیاه، قطر ساقه و سطح برگ وجود داشت و صفات مذکور در رقم سینگل‌کراس ۷۰۴ بیش‌تر از رقم زودرس سینگل‌کراس ۴۱۰ بود (جدول ۱۰) که این تفاوت به دلیل تفاوت‌های ژنتیکی این دو رقم می‌تواند باشد.

## تأثیر محلول‌های غذایی و رقم ذرت بر وزن تازه و خشک شاخساره و ریشه گیاه

نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثر برهمکنش محلول غذایی با رقم بر وزن تازه شاخساره (ساقه + برگ) و ریشه و وزن خشک ریشه در سطح احتمال یک درصد و بر وزن خشک شاخساره در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار بود (جدول ۷). بیش‌ترین وزن تازه و خشک شاخساره و ریشه در گیاهان تغذیه‌شده با محلول غذایی رواکورا در هر دو رقم مشاهده شد (جدول ۱۱).

**جدول ۹.** ضرایب همبستگی پیرسون بین وزن‌های خشک شاخساره و ریشه با غلظت‌های نیتروژن، فسفر و پتاسیم در شاخساره و ریشه.

**Table 11.** Pearson's correlation coefficients between shoot and root dry weights, and the concentrations of nitrogen, phosphorus and potassium in the shoot and root.

| صفات Traits | وزن خشک شاخساره Shoot dry weight (SDW) | وزن خشک ریشه Root dry weight (RDW) | غلظت نیتروژن شاخساره Soot nitrogen concentration (SNC) | غلظت فسفر شاخساره Shoot phosphorus concentration (SPHC) | غلظت پتاسیم شاخساره Shoot potassium concentration (SPOC) | غلظت نیتروژن ریشه Root nitrogen concentration (RNC) | غلظت پتاسیم ریشه Root potassium concentration (RPOC) | غلظت فسفر ریشه Root phosphorus concentration (RPHC) | قطر ساقه Stem diameter (SD) | ارتفاع گیاه Plant height (PH) | سطح برگ Leaf area (LA) | شاخص سبزینگی برگ Leaf greenness index (LGI) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| SDW | 1 | 0.83** | 0.66** | 0.89** | 0.53* | 0.78** | 0.61** | 0.86** | 0.45** | 0.62** | 0.85** | 0.86** |
| RDW | | 1 | 0.86** | 0.64** | 0.41* | 0.75** | 0.46** | 0.63** | 0.45** | 0.56** | 0.83** | 0.70** |
| SNC | | | 1 | 0.51** | 0.39* | 0.75** | 0.32* | 0.51** | 0.36* | 0.37* | 0.66** | 0.70** |
| SPHC | | | | 1 | 0.29 ns | 0.63** | 0.61** | 0.96** | 0.31ns | 0.56** | 0.76** | 0.81** |
| SPOC | | | | | 1 | 0.35* | 0.78** | 0.30 ns | 0.35 ns | 0.30 ns | 0.25 ns | 0.16 ns |
| RNC | | | | | | 1 | 0.56* | 0.58** | 0.31* | 0.62** | 0.62** | 0.77** |
| RPC | | | | | | | 1 | 0.58** | 0.18 ns | 0.38* | 0.48** | 0.36* |
| RPHC | | | | | | | | 1 | 0.34* | 0.55** | 0.77** | 0.78** |
| SD | | | | | | | | | 1 | 0.18 ns | 0.46** | 0.36** |
| PH | | | | | | | | | | 1 | 0.56** | 0.48** |
| LA | | | | | | | | | | | 1 | 0.65** |
| LCCI | | | | | | | | | | | | 1 |

ns : غیرمعنی‌دار، ** : معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد و *: معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد.

ns: non-significant, **: significant at the probability level of 1%, *: significant at the probability level of 5%.

**جدول ۱۰.** مقایسه میانگین اثر رقم ذرت بر ارتفاع گیاه، قطر ساقه و سطح برگ.

**Table 9.** Mean comparisons of the effect of maize cultivar on plant height, stem diameter and leaf area.

| سطح برگ (مترمربع بر بوته) Leaf area ($m^2$ $plant^{-1}$) | قطر ساقه (میلی‌متر) Stem diameter (mm) | ارتفاع گیاه (سانتی‌متر) Plant height (cm) | رقم Cultivar |
|---|---|---|---|
| 0.74[a] | 29.57[a] | 252.23[a] | سینگل‌کراس ۷۰۴ Single cross 704 |
| 0.65[b] | 26.46[b] | 238.30[b] | سینگل‌کراس ۴۱۰ Single cross 410 |

در هر ستون، حروف متفاوت نمایانگر اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد براساس آزمون دانکن هستند.

Means followed by different letters in each column are significantly different at 5% probability level based on Duncan test.

**جدول ۱۱.** مقایسه میانگین اثر برهمکنش محلول غذایی و رقم ذرت بر وزن تازه و خشک شاخساره و ریشه و کارایی مصرف آب.

**Table 10.** Mean comparisons of the interaction effect of nutrient solution and maize cultivar on shoot and root fresh and dry weights and water use efficiency.

| کارایی مصرف آب (کیلوگرم بر متر مکعب) Water use efficiency ($kg$ $m^{-3}$) | وزن خشک ریشه (گرم بر گیاه) Root dry weight ($g$ $plant^{-1}$) | وزن تازه ریشه (گرم بر گیاه) Root fresh weight ($g$ $plant^{-1}$) | وزن خشک شاخساره (برگ+ساقه) (گرم بر گیاه) Shoot dry weight (leaf+stem) ($g$ $plant^{-1}$) | وزن تازه شاخساره (برگ+ساقه) (گرم بر گیاه) Shoot fresh weight (leaf+stem) ($g$ $plant^{-1}$) | محلول غذایی Nutrient solution | رقم Cultivar |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 5.29[c] | 39.30[c] | 397.50[c] | 132.29[c] | 854.25[c] | $S_1$ | سینگل‌کراس ۷۰۴ Single cross 704 |
| 4.20[e] | 25.47[d] | 251.25[f] | 105.08[e] | 661.50[e] | $S_2$ | |
| 5.87[b] | 37.05[c] | 378.00[c] | 146.73[b] | 913.25[b] | $S_3$ | |
| 5.56[bc] | 38.78[c] | 387.50[c] | 139.17[bc] | 908.25[bc] | $S_4$ | |
| 6.32[a] | 73.98[a] | 689.00[a] | 175.74[a] | 1102.00[a] | $S_5$ | |
| 4.89[d] | 30.33[d] | 322.25[d] | 122.51[d] | 684.50[de] | $S_1$ | سینگل‌کراس ۴۱۰ Single cross 410 |
| 3.71[f] | 20.37[e] | 229.00[f] | 92.67[f] | 538.75[f] | $S_2$ | |
| 5.60[bc] | 27.23[d] | 338.00[d] | 139.93[bc] | 879.75[bc] | $S_3$ | |
| 4.84[d] | 25.83[d] | 284.50[e] | 121.04[d] | 736.00[d] | $S_4$ | |
| 6.40[a] | 49.21[b] | 528.25[b] | 177.88[a] | 1076.25[a] | $S_5$ | |

در هر ستون، حروف مشابه نمایانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد براساس آزمون دانکن هستند.

Means followed by the same letters in each column are not significantly different at 5% probability level based on Duncan test.

$S_1$: تمام قدرت هوگلند و آرنون، $S_2$: نیم‌قدرت هوگلند و آرنون، $S_3$: باری و میلر، $S_4$: الکساندر و همکاران، $S_5$: رواکورا

$S_1$: Full strength Hoagland's and Arnon, $S_2$: Half strength Hoagland's and Arnon, $S_3$: Barry and Miller, $S_4$: Alexander et al., $S_5$: Ruakura.

اگرچه وزن تازه و خشک شاخساره در گیاهان تغذیه‌شده با محلول غذایی رواکورا در هر دو رقم ذرت اختلاف معنی‌داری با یک‌دیگر نداشتند. یکی از عوامل مؤثر بر عملکرد گیاه در کشت‌های بدون خاک، غلظت نیتروژن و شکل آن در محلول غذایی است (۳۱ و ۳۲). محلول غذایی رواکورا دارای بیش‌ترین غلظت نیتروژن در میان محلول‌های غذایی مورد استفاده بوده و علاوه بر آن در ترکیب خود دارای نسبت نیترات به آمونیوم ۷۵ به ۲۵ بود (جدول ۱). این امر منجر به بهبود وضعیت تغذیه نیتروژن گیاهان تغذیه‌شده با این محلول غذایی شده (جدول ۴) و با افزایش شاخص‌های رشد رویشی مانند ارتفاع گیاه، قطر ساقه، سطح برگ و شاخص سبزینگی برگ (جدول ۸) منجر به ثبت بیش‌ترین وزن تازه و خشک شاخساره و ریشه در هر دو رقم ذرت شد. وجود همبستگی مثبت و معنی‌دار بین غلظت نیتروژن شاخساره با وزن خشک آن ($r$ = ۰/۶۶ ،$p$ < ۰/۰۱) و ریشه ($r$ = ۰/۸۶ ،$p$ < ۰/۰۱) حاکی از تأثیر مثبت این عنصر بر افزایش این شاخص‌ها است (جدول ۹). در ارتباط با تأثیر شکل نیتروژن محلول غذایی، کلارک (۱۱) نشان داد با کاربرد نسبت ۸۸ به ۱۲ نیترات به آمونیوم بیش‌ترین رشد ذرت و سورگوم در کشت بدون خاک حاصل شد. الکساندر و همکاران (۳) گزارش کردند کاربرد ۳۱ درصد کل نیتروژن محلول غذایی به شکل آمونیوم در تمام دوره رشد و یا نیمی از آن، عملکرد دانه و وزن خشک شاخساره ذرت را در مقایسه با گیاهانی که تنها ۴ درصد نیتروژن را به شکل آمونیوم دریافت کرده بودند افزایش داد. همچنین طباطبایی و همکاران (۳۷) گزارش کردند حذف کامل آمونیوم از محلول غذایی سبب کاهش فتوسنتز و زیست‌توده گیاه شده و بنابراین منبع تأمین نیتروژن باید مخلوطی از نیترات و آمونیوم باشد.

پنگ و همکاران (۲۹) با بررسی اثر شکل نیتروژن بر رشد و عملکرد ذرت در کشت بدون خاک دریافتند در مقایسه با کاربرد هر یک از شکل‌های نیترات یا آمونیوم به‌تنهایی، کاربرد نسبت ۷۵ به ۲۵ نیترات به آمونیوم منجر به افزایش معنی‌دار زیست‌توده شاخساره، ریشه و کل گیاه شد. آن‌ها عنوان کردند زمانی‌که در تأمین نیتروژن گیاه ذرت از هر دو شکل نیتروژن استفاده شد تولید آدنوزین تری‌فسفات (ATP) در گیاه به‌طور معنی‌داری افزایش یافت که این امر به معنای فتوسنتز بیش‌تر و تولید زیست‌توده بیش‌تر در گیاه بود.

قابل ذکر است اگرچه دو محلول غذایی باری و میلر و الکساندر و همکاران نیز در ترکیب خود دارای هر دو شکل نیتروژن بودند (نسبت نیترات به آمونیوم در این دو محلول به‌ترتیب ۶۹/۵ به ۳۰/۵ و ۹۵/۶ به ۴/۴ بود) اما به نظر می‌رسد غلظت کم نیتروژن کل در این دو محلول (جدول ۱) منجر به کاهش معنی‌دار وزن تازه و خشک شاخساره و ریشه هر دو رقم ذرت در مقایسه با محلول غذایی رواکورا شده است. به‌طوری‌که در رقم سینگل‌کراس ۷۰۴ وزن تازه گیاهان تغذیه‌شده با محلول غذایی باری و میلر و الکساندر و همکاران به‌ترتیب ۱۷/۱ و ۱۷/۶ درصد و در رقم سینگل‌کراس ۴۱۰ به‌ترتیب ۱۸/۳ و ۳۱/۶ درصد نسبت گیاهان رشدیافته در محلول غذایی رواکورا کاهش یافت. از این‌رو تأمین کافی نیتروژن محلول غذایی برای دستیابی به بیش‌ترین وزن تازه شاخساره در کشت بدون خاک ذرت علوفه‌ای ضروری است. از طرف دیگر یکی دیگر از دلایل افزایش معنی‌دار وزن تازه و خشک شاخساره و ریشه در گیاهان تغذیه‌شده با محلول غذایی رواکورا را می‌توان به توازن غلظت فسفر در ارتباط با عناصر دیگر نسبت داد. بر مبنای نتایج جدول (۴) بیش‌ترین غلظت فسفر در برگ، ساقه و ریشه در گیاهان تغذیه‌شده با این محلول غذایی مشاهده شد. وجود همبستگی مثبت و معنی‌دار بین غلظت فسفر در شاخساره با وزن خشک شاخساره ($r$ = ۰/۸۹ ،$p$ < ۰/۰۱) و ریشه ($r$ = ۰/۶۴ ،$p$ < ۰/۰۱) نشان‌دهنده تأثیر مثبت این عنصر بر افزایش این شاخص‌ها است (جدول ۹). در این راستا کلارک (۱۱) گزارش کرد با افزایش غلظت فسفر در محلول غذایی از ۰/۰۶ به ۰/۹۶ میلی‌مول بر لیتر، وزن خشک ریشه به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. با توجه به نتایج بدست‌آمده می‌توان گفت محلول غذایی روکورا ضمن تأمین عناصر غذایی مورد نیاز ذرت علوفه‌ای، دارای توازن بین عناصر غذایی

بوده و در نتیجه منجر به تولید بیش‌ترین عملکرد در گیاه شده است. برهم‌خوردن تعادل میان عناصر غذایی در یک محلول غذایی می‌تواند منجر به کاهش عملکرد گیاه شود. به‌عنوان مثال کلیک و همکاران (۹) گزارش کردند در کشت بدون خاک ذرت بیش‌ترین وزن خشک برگ ذرت در محلول غذایی حاوی ۴ میلی‌مولار پتاسیم و ۱۲۰ میکرومولار آهن حاصل شد. افزایش پتاسیم در محلول غذایی سبب کاهش وزن خشک برگ شد، به‌طوری‌که کم‌ترین وزن خشک در محلول غذایی حاوی ۸ میلی‌مولار پتاسیم و ۱۲۰ میکرومولار آهن مشاهده شد. آن‌ها دلیل کاهش وزن خشک را برهمکنش منفی ناشی از پتاسیم و آهن در غلظت‌های زیاد با دیگر عناصر غذایی موجود در محلول غذایی دانستند. گزارش شده است گیاهانی که بیش از اندازه پتاسیم جذب می‌کنند، جذب و انتقال آهن در آن‌ها کاهش می‌یابد (۴۰). بر مبنای نتایج این پژوهش بهبود وضعیت تغذیه‌ای گیاه با افزایش شاخص‌های رشد رویشی منجر به افزایش عملکرد گیاه شده است. وجود همبستگی مثبت و معنی‌دار بین وزن خشک شاخساره با ارتفاع گیاه ($p < ۰/۰۱$، $r = ۰/۶۲$)، قطر ساقه ($p < ۰/۰۱$، $r = ۰/۴۵$)، سطح برگ ($p < ۰/۰۱$، $r = ۰/۸۵$) و شاخص سبزینگی برگ ($p < ۰/۰۱$، $r = ۰/۸۶$) و همچنین بین وزن خشک ریشه با ارتفاع گیاه ($p < ۰/۰۱$، $r = ۰/۵۶$)، قطر ساقه ($p < ۰/۰۱$، $r = ۰/۴۵$)، سطح برگ ($p < ۰/۰۱$، $r = ۰/۸۳$) و شاخص سبزینگی برگ ($p < ۰/۰۱$، $r = ۰/۷۰$) این موضوع را نشان می‌دهد (جدول ۹). در هر دو رقم ذرت کم‌ترین وزن تازه و خشک شاخساره و ریشه گیاه در گیاهان تغذیه‌شده با محلول غذایی نیم‌قدرت هوگلند و آرنون مشاهده شد (جدول ۱۱). به نظر می‌رسد غلظت کم عناصر غذایی در این محلول غذایی با ایجاد کمبود احتمالی در گیاه منجر به کاهش معنی‌دار وزن تازه و خشک شاخساره و ریشه در هر دو رقم ذرت تغذیه‌شده با این محلول غذایی شده است. اگرچه علائم ظاهری کمبود عناصر غذایی در گیاهان تغذیه‌شده با این محلول غذایی دیده نشد. در رقم سینگل‌کراس ۷۰۴ با کاربرد محلول غذایی رواکورا به‌ازای هر متر مکعب محلول غذایی ۶/۳۲ کیلوگرم و در رقم سینگل‌کراس ۴۱۰ مقدار ۶/۴۰ کیلوگرم علوفه خشک ذرت تولید شد (جدول ۱۱). این نتایج بیان می‌کند که استفاده از محلول غذایی رواکورا ضمن تأمین عناصر غذایی مورد نیاز گیاه با بهبود شاخص‌های رشد رویشی و عملکرد گیاه منجر به بهبود روابط آبی در گیاه نیز شده است. برخی از عناصر غذایی مانند نیتروژن و پتاسیم با تأثیر بر روابط آبی گیاه و بر کارایی مصرف آب مؤثرند. در همین زمینه یوهارت و آندرید (۳۹) عنوان کردند با افزایش میزان نیتروژن مصرفی، کارایی مصرف آب افزایش یافت. همچنین با توجه به نقش پتاسیم در باز و بسته شدن روزنه‌ها، تأمین مطلوب آن برای کارکرد طبیعی روزنه‌های گیاه (۲۰) و در نتیجه بهبود کارایی مصرف آب گیاه ضروری است. مقایسه کارایی مصرف آب در گیاهان تولیدشده در شرایط این پژوهش (کشت بدون خاک در شرایط گلخانه) با گیاهان تولیدشده در کشت خاکی مزرعه‌ای حاکی از افزایش این شاخص در کشت بدون خاک بود.

در همین زمینه نادری و همکاران (۲۵) گزارش کردند در رقم سینگل‌کراس ۷۰۴ در کشت مزرعه‌ای بیش‌ترین کارایی مصرف آب حدود ۲/۲۷ کیلوگرم ماده خشک به‌ازای یک مترمکعب آب مصرفی بود. همچنین محمدنژاد و همکاران (۲۳) بیش‌ترین کارایی مصرف آب ذرت علوفه‌ای رقم سینگل‌کراس ۷۰۴ را ۱/۶ کیلوگرم بر مترمکعب آب مصرفی در کشت مزرعه‌ای عنوان کردند. بنابراین با توجه به افزایش کارایی مصرف آب ذرت علوفه‌ای در کشت بدون خاک گلخانه‌ای و همچنین بحران آب در بخش کشاورزی، به‌کار بستن این روش می‌تواند در استفاده بهینه از آب نیز مؤثر باشد.

## نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد استفاده از محلول غذایی رواکورا سبب افزایش شاخص‌های رشد رویشی، تولید بیش‌ترین وزن تازه و خشک شاخساره و ریشه و همچنین کارایی مصرف آب گیاه شد. بنابراین می‌توان گفت این محلول غذایی نسبت به

چهار محلول مورد استفاده دیگر، مناسب‌ترین محلول برای کشت بدون خاک ذرت علوفه‌ای است. با توجه به نبود تفاوت معنی‌دار بین دو رقم ذرت (سینگل‌کراس ۷۰۴ و سینگل‌کراس ۴۱۰) تغذیه‌شده با محلول غذایی رواکورا از لحاظ وزن تازه و خشک شاخساره و همچنین کارایی مصرف آب، کشت هر دو رقم در شرایط کشت بدون خاک قابل انجام است. کاهش طول دوره رشد محصول در شرایط گلخانه‌ای به دلیل تأمین مطلوب عوامل محیطی مورد نیاز، امکان انجام چندین مرتبه کشت در سال و افزایش کارایی مصرف آب از دیگر مزایای تولید ذرت علوفه‌ای در کشت بدون خاک هستند. بنابراین با توجه به وضعیت بحرانی آب در بخش کشاورزی و لزوم استفاده بهینه از آن، کشت بدون خاک ذرت در شرایط گلخانه‌ای می‌تواند به‌عنوان یک راهکار برای تأمین بخشی از علوفه مورد نیاز کشور مطرح باشد. البته انجام ارزیابی اقتصادی در این مورد ضروری است.

## تشکر و سپاسگزاری

بدین وسیله از معاونت پژوهشی دانشگاه شهرکرد برای حمایت مالی این پژوهش تشکر و قدردانی می‌شود.

## تضاد منافع

نویسندگان مقاله اذعان دارند هیچ‌گونه تضاد منافعی با شخص، شرکت یا سازمانی برای این پژوهش ندارند.

## منابع مورد استفاده

1. Abouelezz, F.M.K., Hussein, A.M.A., 2017. Evaluation of baker's yeast (*Saccharomyces cerevisiae*) supplementation on the feeding value of hydroponic barley sprouts for growing rabbits. *Egyptian Poultry Science Journal* 37(3): 833–854.
2. Adeyemi, T.A., Adeoye, S.A., Ogunyemi, T.J., Adedeji, E.A., Oluyemi, B., Ojob, V.O.A., 2020. Comparisons of nutrient solutions from organic and chemical fertilizer sources on herbage yield and quality of hydroponically produced maize fodder. *Journal of Plant Nutrition* 44(9): 1349–1364.
3. Alexander, K.G., Miller, M.H., Beauchamp, E.G., 1991. The effect of an $NH_4^+$ enhanced nitrogen source on the growth and yield of hydroponically grown maize (*Zea mays* L.). *Journal of Plant Nutrition* 14(1): 31–44.
4. Arzani, A., 2007. Commercial and Home Hydroponics. Isfahan University of Technology, Isfahan. (In Persian)
5. Assefa, G., Urge, M., Animut, G., Assefa, G., 2020. Effect of variety and seed rate on hydroponic maize fodder biomass yield, chemical composition, and water use efficiency. *Biotechnology in Animal Husbandry* 36(1): 87–100.
6. Barry, D.A.J., Miller, M.H., 1989. Phosphorus nutritional requirement of maize seedlings for maximum yield. *Agronomy Journal* 81(1): 95–99.
7. Below, F.E., Lammert, R.J., Hageman, R.H., 1984. Foliar applications of nutrients on maize. I. Yield and N content of grain and stover. *Agronomy Jounal* 76(5):773–777.
8. Bredemeier, C., 2005. Laser-induced Chlorophyll Fluorescence Sensing as a Tool for Site-specific Nitrogen Fertilizer Evaluation under Controlled Environmental and Field Conditions in Wheat and Maize. PhD Thesis, Technical University of Munich, Munich, Germany.
9. Celik, H., Asik, B. B., Katkat, A., 2010. Effect of potassium and iron on macro element uptake of maize. *Zemdirbyste-Agriculture* 97(1): 11–22.
10. Chen, J., 2007. Rapid urbanization in China: a real challenge to soil protection and food security. *Catena* 69(1): 1–15.
11. Clark, R.B., 1982. Nutrient solution growth of sorghum and corn in mineral nutrition studies. *Journal of Plant Nutrition* 5(8): 1039–1057.
12. Dwyer, L.M., Stewart, D.W., Carrigna, L., Ma, B.L., Neave, P., 1999. Guidelines for comparisons among different corn-maturity rating systems. *Agronomy Journal* 91(6): 122–131.
13. Fallovo, C., Rouphael, Y., Cardarelli, M., Rea, E., Battistelli, A., Colla, D., 2009. Yield and quality of leafy lettuce in response to nutrient solution composition and growing season. *The Journal of Food, Agriculture and Environment* 7(2): 456–462.
14. Goldani, M., Kharazi, S.M., Petar, P., 2010. The effect of micronutrients (NPK) on some growth characteristics of two commercial corn cultivars (Ressuda Pionee , KWS2360) (*Zea mays* L.) in water culture environment. *Journal of Agroecology* 2(3):459–473. (In Persian with English abstract)
15. Hoagland, D.R., Arnon, D.I., 1950. The water culture methods for growing plants without soil. California

Agricultural Experiment Station, Circular 347.
16. Hosainy Abrandabadi, S.A.,Hosainy nasab H.,Pourmirzayee H.R., Fazaeli H. 2015. Performance of fattening lambs fed hydroponic barley green fodder. *Animal Science Journal* 106: 157–168. (In Persian with English abstract)
17. Jones J.B. Jr., 2001. Laboratory Guide for Conducting Soil Tests and Plant Analysis. CRC Press, Boca Raton, FL, USA.
18. Jung-Soo Lee, J.S., Chandra, D., Son, J., 2022. Growth, physicochemical, nutritional, and postharvest qualities of leaf lettuce (*Lactuca sativa* L.) as affected by cultivar and amount of applied nutrient solution. *Horticulturae.* 8: 436. doi.org/10.3390/horticulturae8050436.
19. Kiani, Sh., 2019. Effect of different nutrient solutions on the yield, chemical composition and nitrate accumulation of lettuce in soilless culture system. *Journal of Science and Technology of Greenhouse Culture* 10(4): 77–87.
20. Marschner, P., 2012. Mineral Nutrition of Higher Plants. Academic Press, Germany.
21. Marsico, G., Micera, E., Dimatteo, S., Minuti, F., Arcangelo Vicenti, A. and Zarrilli, A., 2009. Evaluation of animal welfare and milk production of goat fed on diet containing hudroponically-germinating seeds. *Italian Journal of Animal Science* 8: 625–627.
22. Mengel, K., E.A., 2001. Principles of Plant Nutrition. 5th Ed. Boston: Kluwer Academic Publishers, USA.
23. Mohammadnejad, A., Najafi, N., Nishabouri, M.R., 2015. Effects of three types of organic fertilizers on the growth characteristics and water use efficiency of corn at different levels of soil compaction. *Journal of Soil Management and Sustainable* 5(2):25–47.
24. Moody, P.W., Edwards, D.G., Bell, L.C., 1995. Effect of banded fertilizers on soil solution composition and short-term root growth. II. Mono and diammonium phosphates. *Australian Journal of Soil Research* 33(4): 673–683.
25. Naderi N., Ahmadi, M.Z., Fazloula, R., Shahnazari, A., Khavari Khorasani. S., 2015. Evaluating the effect of different methods of deficit Irrigation on yield, yield components and irrigation water productivity of forage maize. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage* 3(9): 522–530. (In Persian with English abstract)
26. Naik, P.K., 2012. Hydroponic technology for fodder production. ICAR News 18(3): 1–9.
27. Naik, P.K., Dhuri, R.B., Swain, B.K. Singh, N.P., 2012. Nutrient changes with the growth of hydroponics fodder maize. *Indian Journal of Animal Nutrition* 29(2): 161–163.
28. Ningoji, S.N., Thimmegowda, M.N., Boraiah, B., Anand, M.R., Krishna Murthy, R., Asha, N.N., 2020. Effect of seed rate and nutrition on water use efficiency and yield of hydroponics maize fodder. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences* 9(1): 71–79.
29. Peng, W., Zhang-kui, W., Xi-chao, S., Xiao-huan, M.U., Huan, C., Fan-jun, C., Lixing, Y., Guo-hua, M.I., 2018. Interaction effect of nitrogen form and planting density on plant growth and nutrient uptake in maize seedlings. *Journal of Integrative Agriculture* 18(5): 1120–1129.
30. Salardini, A. A., 2005. Soil Fertility. Tehran University Publications, 7th ed., Tehran.
31. Santos, J.H.S., Bona, F.D., Monteiro, F.A., 2013. Growth and productive responses of tropical grass *Panicum maximum* to nitrate and ammonium supply. *Revista Brasileira de Zootecnia* 42(9): 622–628.
32. Sarasketa, A., González-Moro, M.B., González-Murua, C. Marino, D., 2016. Nitrogen source and external medium pH interaction differentially affects root and shoot metabolism in Arabidopsis. *Frontiers in Plant Science.* 7: 29. doi.org/10.3389/fpls.2016.00029.
33. Savvas, D., Adamidis. K., 1999. Automated management of nutrient solutions based on target electrical conductivity, pH, and nutrient concentration ratios. *Journal of Plant Nutrition* 22(9): 1415–1432.
34. Smith, G.S., Johnston, C.M., Cornforth, I.S., 1983. Comparison of nutrient solutions for growth of plants in sand culture. *New Phytologist* 94(4): 537–548.
35. Sriagtula, R., Martaguri, I., Sowmen, S., Zurmiati., 2021. Evaluation of nutrient solution dose and harvest time on forage sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) in hydroponic fodder system. In: Second International Conference on Animal Production for Food Sustainabilitylp, via Online Zoom Meeting, Indonesia, June 16.
36. Stewart, Z.P., Paparozzic, L.T., Djanaguiramana, M., Shapiro, C.A, 2019. Lipid-based Fe- and Zn- nanoformulation is more effective in alleviating Fe- and Zn-deficiency in maize. *Joural of Plant Nutrition* 42(14): 1693–1708.
37. Tabatabaei, S.J., Yusefi, M., Hajiloo, J., 2007. Effects of shading and $NO_3$:$NH_4$ ratio on the yield, quality and N metabolism in strawberry. *Scientia Horticulturae* 116(3): 264–272.
38. Tomasi, N., Pinton, R., Dalla Costa, L., Cortella, G., Terzano, R., Mimmo, T., Scampicchio, M., Cesco, S., 2015. New 'solutions' for floating cultivation system of ready-to-eat salad: a review. *Trends in Food Science & Technology.* 46(2): 267–276.
39. Uhart, S.A., Andrade, F.H., 1995. Nitrogen deficiency in maize: I. Effect on crop growth, development, dry matter partitioning and kernel set. *Crop Science* 35(5): 136–1383.
40. Urrestarazu, M., Sanchez, A., Alvarado, J., 1994. Iron indices and micronutrients in deciduous fruit trees. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 25(9-10): 1685–1701.
41. Verones, F., Pfister, S., van Zelm, R., Hellweg, S., 2017. Biodiversity impacts from water consumption on a global

scale for use in life cycle assessment. *The International Journal of Life Cycle Assessment.* 22: 1247–1256.
42. Zhang, F.C., Kang, S.Z., Li, F.S. Zhang, J.H., 2007. Growth and major nutrient concentrations in *Brassica campestris* supplied with different $NH_4^+/NO_3^-$ ratios. *Journal of Integrative Plant Biology* 49(4): 455–462.