



SBSI



انجمن علوم زراعت و اصلاح نباتات ایران

Evaluating root yield and growth indices of sugar beet under transplanting and direct sowing in cold semi-arid regions

Abdolmajid Soheilnejad,¹ Sajjad Rahimi-Moghaddam,^{2*}

(Received: 30 Nov. 2025 ; Accepted: 25 Feb. 2026)

How to cite this article:

Soheilnejad A, Rahimi-Moghaddam S. Evaluating root yield and growth indices of sugar beet under transplanting and direct sowing in cold semi-arid regions. Journal of sugar beet. 2026; (41)2. 319-332. (In Persian with English abstract).

DOI: 10.22092/jsb.2026.371597.1402.

Extended Abstract

Introduction

Sugar beet (*Beta vulgaris* L.) is one of the most important field crops worldwide and in Iran, playing a crucial role not only in sugar production but also in maintaining sustainable crop rotations and improving soil properties. In recent decades, increasing water scarcity and climate change have intensified the need for improving crop management strategies in sugar beet cultivation systems. One of the promising agronomic approaches to improve crop establishment, shorten the time required to achieve full canopy cover, and enhance water productivity is transplanting instead of direct-seeded. From a physiological perspective, growth analysis is a powerful tool for studying biomass accumulation and plant development dynamics during the growing season. Growth indices such as total dry weight (TDW) and leaf area index (LAI) are widely used indicators for evaluating crop growth and physiological status. Therefore, the objective of the present study was to evaluate root yield and growth indices of sugar beet under transplanting and direct-seeded systems in three cold semi-arid regions of Iran.

Materials and Methods

The current research aimed to evaluate the effects of two transplanting ages (35 and 45 days) and direct-seeded sowing on growth indices and root yield of sugar beet across three cold semi-arid regions: Ardebil, Tabriz, and Urmia. Crop growth was simulated using the SUCROS model based on long-term climatic data (1980-2020) and soil physical-hydrological characteristics. Growth indices including TDW, LAI, RGR, and CGR were derived using functional growth models and compared

across planting systems. To determine the initial physiological conditions of seedlings, the model was first run independently under potential growth conditions to estimate the initial dry weight of different plant organs (leaf blades, petioles, roots, and storage organs) as well as initial LAI values. These simulated values were then used as initial parameters in the main model runs. For comparison, direct-seeded was also simulated as the conventional planting method. All three planting systems (direct-seeded, 35-day transplanting, and 45-day transplanting) were simulated using the common planting dates of each region. Irrigation scheduling was applied when soil moisture declined to approximately 70% of field capacity according to FAO irrigation management recommendations. Other agronomic parameters such as plant density and row spacing were kept constant across all simulations. To analyze growth indices, TDW and LAI were recorded throughout the growing season. The logarithm of TDW was fitted using a third-order polynomial model, from which RGR was calculated as the derivative of $\ln$ (TDW). CGR was then calculated as the product of RGR and TDW. LAI dynamics were described using a logistic sigmoid model. Model fitting was performed using least-squares regression in the R software environment. Root yield was analyzed as a long-term time series for each location and planting system. Linear regression was applied to evaluate annual trends in root yield and to determine statistical significance of changes over time.

Results

Transplanting markedly improved early crop establishment. In transplant treatments, LAI peaked around 120 days after planting at 7.4 in Ardebil, 6.6 in

1. Agriculture Department, Faculty of Agriculture, Payame Noor University, Tehran, Iran

2. Plant Production and Genetics Engineering Department, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Khorramabad, Iran.

*Corresponding author: sajadr.moghaddam@yahoo.com

Tabriz, and 7.05 in Urmia, whereas corresponding values under direct-seeded sowing were approximately 6.1, 3.3, and 3.8, respectively. Maximum CGR in the 45-day transplanting treatment reached $19.2 \text{ g m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ in Ardebil, $21 \text{ g m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ in Tabriz, and $22.3 \text{ g m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ in Urmia. In contrast, RGR was naturally lower in transplant treatments due to higher initial dry weight and elevated respiratory costs; nevertheless, this reduction did not hinder the superior final dry matter accumulation of transplants. TDW was also higher under 45-day transplanting, reaching 1902 g m^{-2} in Ardabil, 2001 g m^{-2} in Tabriz, and about 2471 g m^{-2} in Urmia by day 170, all substantially exceeding the values under direct sowing. Root yield followed the same trend: the highest root yield (108 t ha^{-1}) occurred in the 45-day transplanting treatment in Urmia, whereas the lowest (68 t ha^{-1}) was observed under direct sowing in Tabriz. The long-term trend analysis showed that annual yield fluctuations in Ardebil were not statistically significant ($p > 0.14$), with a maximum annual slope of 0.15 t ha^{-1} . In contrast, all cropping systems in Tabriz and Urmia exhibited significantly declining yield trends ($p < 0.001$). The estimated annual rate of decline ranged from 0.20 to 0.27 t ha^{-1} in Tabriz and approximately 0.55 to 0.60 t ha^{-1} in Urmia. These findings are consistent with previous studies indicating that transplanting improves canopy development, radiation interception, and biomass accumulation in sugar beet and other crops. Similarly, it was reported that transplanting 35–40-day-old seedlings resulted in the highest root yields in sugar beet production systems. Furthermore, transplanting has been shown to improve water productivity and reduce irrigation requirements compared with direct.

Conclusion

Overall, the results of this study demonstrate that transplanting provides clear advantages for sugar beet growth and productivity in cold semi-arid regions. Transplanted plants exhibited earlier canopy development, higher LAI, greater crop growth rate, and increased total dry matter accumulation compared with

direct-seeded. Although relative growth rate was slightly lower in transplanted plants due to higher initial biomass, this did not negatively affect final root yield. Among the studied regions, Urmia showed the highest yield potential due to more favorable climatic conditions, whereas Tabriz showed lower productivity. Overall, transplanting 35–45-day-old seedlings increased root yield by approximately 8–11% compared with direct-seeded. Therefore, transplanting can be considered an effective agronomic strategy for improving sugar beet establishment, growth performance, and yield stability, particularly in environments where early-season conditions limit successful crop establishment. Future studies should evaluate transplanting performance under a wider range of climatic conditions to further improve sugar beet production systems.

Keywords

Crop growth rate, Leaf area index, Relative growth rate, SUCROS model.

References

- Deihimfard R, Rahimi-Moghaddam S, Goudriaan J, Damghani AM, Noori O, Nazari S. Can optimizing the transplant of sugar beet by age and date enhance water productivity in arid and semi-arid climates?. *Field Crops Research*. 2021; 271. **Doi:** <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108266>
- Guo C, Yang C, Fu J, Song Y, Chen S, Li H, Ma C. Effects of crop rotation on sugar beet growth through improving soil physicochemical properties and microbiome. *Industrial Crops and Products*. 2024; 212. **Doi:** <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.118331>
- Poojitha K, Pravalika KM, Theerthana T, Prashanth DV. Transplanted v/s direct-seeded method of rice: A Review. *Journal of Experimental Agriculture International*. 2024; 46(5): 681-685. **Doi:** <https://doi.org/10.9734/jeai/2024/v46i52422>

ارزیابی عملکرد ریشه و شاخص‌های رشدی چغندرقد تحت کشت نشائی و مستقیم در مناطق نیمه خشک و سرد[†]

عبدالمجید سهیل‌نژاد^۱، سجاد رحیمی مقدم^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۹/۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۴

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.22092/jsb.2026.371597.1402

ع. سهیل‌نژاد و س. رحیمی مقدم، ۱۴۰۴. ارزیابی عملکرد ریشه و شاخص‌های رشدی چغندرقد تحت کشت نشائی و مستقیم در مناطق نیمه خشک و سرد. چغندرقد

۳۳۲-۳۱۹: (۲)۴۱

چکیده

این پژوهش با هدف بررسی اثر دو روش کاشت نشائی (در سنین ۳۵ و ۴۵ روزه) و کشت مستقیم بر شاخص‌های رشدی و عملکرد ریشه چغندرقد در سه منطقه‌ی نیمه‌خشک و سرد اردبیل، تبریز و ارومیه با انجام شبیه‌سازی رشد با استفاده از مدل SUCROS و بر پایه‌ی داده‌های بلندمدت اقلیمی (۱۳۵۸ تا ۱۳۹۸) و ویژگی‌های فیزیکی-آبی خاک صورت گرفت. شاخص‌های LAI ، RGR و CGR با مدل‌های تابعی رشد استخراج و برای مقایسه سیستم‌های کاشت تحلیل شدند. نتایج نشان داد کشت نشائی استقرار اولیه گیاه را به‌طور محسوسی بهبود داد. مقدار LAI در تیمارهای نشاکاری در حدود ۱۲۰ روز پس از کاشت به $7/4$ در اردبیل، $6/6$ در تبریز و $7/05$ در ارومیه رسید در حالی که این مقدار در کشت مستقیم به ترتیب حدود $1/6$ ، $3/3$ و $3/8$ بود. CGR در تیمار نشاکاری ۴۵ روزه در بیشترین مقدار خود به $19/2$ گرم بر مترمربع در روز در اردبیل، ۲۱ گرم بر مترمربع در تبریز و $22/3$ گرم بر مترمربع در ارومیه رسید. در مقابل، RGR به‌طور طبیعی در تیمارهای نشاکاری کمتر بود، که ناشی از وزن خشک اولیه بالاتر و هزینه‌ی تنفسی بیشتر نشا است، با این حال این کاهش مانع برتری نهایی نشاکاری در تجمع ماده خشک نشد. تجمع ماده خشک کل (TDW) نیز در نشاکاری ۴۵ روزه بیشتر بود؛ به‌طوری که در روز ۱۷۰ مقدار TDW در اردبیل به 1902 گرم بر مترمربع، در تبریز به 2001 گرم بر مترمربع و در ارومیه به حدود 2471 گرم بر مترمربع رسید، در حالی که این مقدار در کشت مستقیم به مراتب پایین‌تر بود. عملکرد ریشه نیز الگوی مشابهی داشت: بیشترین عملکرد ریشه (حدود 108 تن در هکتار) در نشاکاری ۴۵ روزه ارومیه و کمترین مقدار (حدود 68 تن در هکتار) در کشت مستقیم تبریز مشاهده شد. در مجموع، نتایج نشان می‌دهد نشاکاری می‌تواند راهبردی مؤثر برای بهبود شاخص‌های رشد و دستیابی به عملکرد ریشه بالاتر چغندرقد در مناطق سرد و نیمه‌خشک باشد.

واژه‌های کلیدی: شاخص سطح برگ، مدل SUCROS، نرخ رشد محصول، نرخ رشد نسبی



[†] - این مقاله نتیجه پژوهش نویسندگان است.

۱. استادیار، گروه کشاورزی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران.

۲. دانشیار، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران.

*- نویسنده مسئول: sajadr.moghaddam@yahoo.com

مقدمه

چغندرقد (*Beta vulgaris* L.) یکی از محصولات زراعی مهم در جهان و ایران است که علاوه بر نقش کلیدی در تأمین قند، در پایداری تناوب‌های زراعی و بهبود ویژگی‌های خاک نیز نقش دارد (Ivanina et al. 2021). در دهه‌های اخیر، کاهش منابع آب و تغییرات اقلیمی موجب شده است که روش‌های بهینه‌ی کاشت و مدیریت چغندرقد مورد توجه ویژه قرار گیرند (Guo et al. 2024). یکی از رویکردهای نوین برای بهبود استقرار گیاه، کاهش فاصله‌ی زمانی کاشت تا پوشش کامل سطح زمین و افزایش بهره‌وری مصرف آب، استفاده از کشت نشائی در مقایسه با کشت مستقیم است (Khozaei et al. 2020). کشت نشائی در مقایسه با کشت مستقیم می‌تواند موجب استقرار سریع‌تر گیاه، افزایش رقابت‌پذیری در برابر علف‌های هرز، استفاده‌ی مؤثرتر از منابع محیطی و در برخی شرایط، افزایش عملکرد و کیفیت محصول شود (Khaembah and Nelson 2016; Mansouri et al. 2021). همچنین در مناطق سرد و نیمه‌خشک، که جوانه‌زنی بذر در خاک‌های سرد و سنگین با محدودیت روبه‌رو است، کشت نشائی با انتقال گیاهچه‌های آماده می‌تواند این محدودیت را کاهش داده و سبب افزایش تراکم مؤثر بوته‌ها گردد (Cheshmi et al. 2023).

از دیدگاه فیزیولوژیکی، تحلیل رشد گیاه ابزاری مؤثر برای بررسی فرآیندهای تجمع ماده‌ی خشک و تغییرات زمانی آن است. شاخص‌های رشدی مانند وزن خشک کل گیاه (TDW) و شاخص سطح برگ (LAI) معیارهایی مهم برای ارزیابی رشد و وضعیت فیزیولوژیک گیاه هستند. این شاخص‌ها امکان محاسبه نرخ‌های رشد نسبی (RGR) و تجمعی ماده خشک (CGR) را فراهم می‌کنند و در مطالعات عملکرد و کارایی فتوسنتزی گیاهان زراعی کاربرد دارند (Ben-Gal and Shani 2002; Tsialtas and Maslaris 2005; Hunt 2012; Radford 1967). شاخص‌های رشدی مانند وزن خشک کل گیاه (TDW) و شاخص سطح برگ (LAI) معیارهایی مهم برای ارزیابی رشد و وضعیت فیزیولوژیک گیاه هستند. این شاخص‌ها امکان محاسبه نرخ‌های رشد نسبی (RGR) و تجمعی ماده خشک (CGR) را

فراهم می‌کنند و در مطالعات عملکرد و کارایی فتوسنتزی گیاهان زراعی کاربرد دارند (Ben-Gal and Shani 2002; Tsialtas and Maslaris 2005; Hunt 2012; Radford 1967).

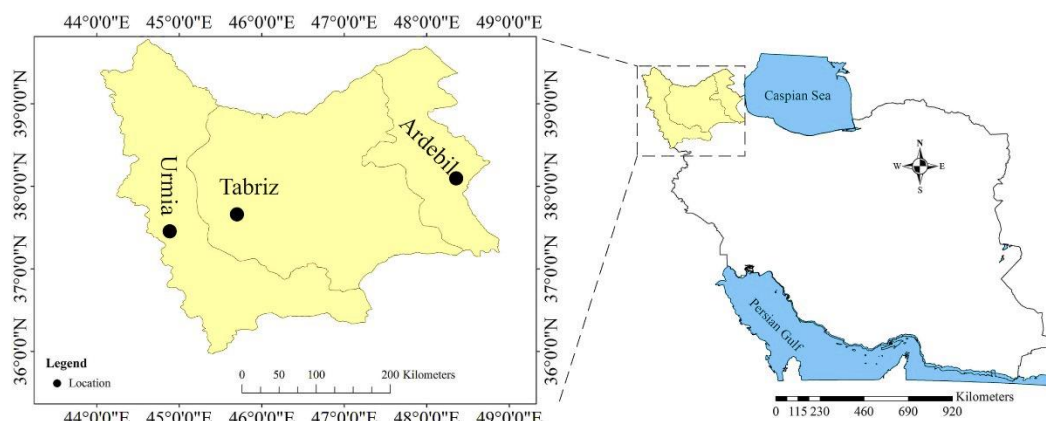
استفاده از مدل‌های تابعی نسبت به روش‌های گسسته، دقت بالاتری در برآورد شاخص‌های رشد دارد و امکان تحلیل رفتار دینامیکی گیاه در مراحل مختلف رشد را فراهم می‌کند (Evans 1972). در مطالعات مربوط به چغندرقد، گزارش شده است که الگوی تغییرات RGR در طول فصل زراعی از یک روند افزایشی در مراحل ابتدایی به روند کاهشی در مراحل پایانی تغییر می‌کند که این امر بیانگر پیری تدریجی برگ‌ها و کاهش سطح فعال فتوسنتزی است (Mirzaei and Abdollahian-Noghabi 2012). از سوی دیگر، CGR بیشینه در مرحله‌ی رشد سریع ریشه مشاهده می‌شود و پس از آن کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده‌ی تغییر تخصیص مواد از اندام هوایی به ریشه است (Deihimfard et al. 2021). چنین تحلیل‌هایی به‌ویژه در مقایسه‌ی سیستم‌های کشت نشائی و مستقیم می‌تواند تفاوت‌های فیزیولوژیکی میان آن‌ها را آشکار سازد.

در مناطق نیمه‌خشک و سرد، طول دوره‌ی رشد محدود و خطر تنش‌های حرارتی بالا است لذا اتخاذ روش کاشت مناسب برای استفاده‌ی بهینه از دوره‌ی رشد، اهمیت زیادی دارد (Mansouri et al. 2021). علاوه بر این، انتخاب روش کاشت بر شاخص‌های رشد و در نهایت بر عملکرد و کارایی مصرف آب تأثیرگذار است (Khozaei et al. 2020). بنابراین، بررسی مقایسه‌ای شاخص‌های رشدی در روش‌های کاشت نشائی و مستقیم می‌تواند دیدگاه روشنی از رفتار رشد، تخصیص بیوماس و سازگاری فیزیولوژیکی گیاه در این شرایط فراهم کند. با توجه به اهمیت موضوع، هدف از پژوهش حاضر ارزیابی عملکرد ریشه و شاخص‌های رشدی چغندرقد تحت دو روش کاشت نشائی و مستقیم در سه منطقه‌ی نیمه‌خشک و سرد (اردبیل، تبریز و ارومیه) بود. در این مطالعه، با استفاده از مدل‌های تابعی رشد، مقادیر TDW و LAI مدل‌سازی و شاخص‌های RGR و CGR از روابط مشتق‌شده‌ی ریاضی محاسبه شدند تا تفاوت‌های دینامیک رشد بین روش‌ها و مناطق مورد بررسی قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در سه منطقه اردبیل، تبریز و ارومیه به روش شبیه‌سازی صورت گرفت. بر اساس طبقه‌بندی اقلیمی کوپن،

مناطق مورد بررسی در رده‌ی اقلیم نیمه‌خشک و سرد و نیمه‌خشک قرار گرفتند (Peel et al. 2007). در شکل ۱ موقعیت جغرافیایی مناطق مورد مطالعه نشان داده شده است.



شکل ۱ موقعیت جغرافیایی مناطق مورد بررسی شامل اردبیل، تبریز و ارومیه.

Fig 1 Geographical position of study locations including Ardebil, Tabriz, and Urmia.

ارزیابی شده است (Deihimfard et al. 2019; Mohammadi-Ahmadm Mahmoudi et al. 2020; Deihimfard et al. 2021). بنابراین در مطالعه حاضر از مدل ارزیابی شده استفاده شد.

داده‌های بلندمدت روزانه (۱۳۵۸ تا ۱۳۹۸) شامل ورودی‌های مدل شامل داده‌های روزانه دما (حداکثر و حداقل)، تابش خورشیدی، بارندگی، سرعت باد و فشار بخار آب بود که از سازمان هواشناسی کشور گردآوری شدند. داده‌های خاک شامل درصد ذرات، چگالی ظاهری و کربن آلی بود که از منابع مختلف از جمله سازمان هواشناسی کشاورزی و پژوهش‌های پیشین (Deihimfard et al. 2021) گردآوری شدند. این داده‌ها برای برآورد ویژگی‌های رطوبتی خاک مورد نیاز مدل (مانند رطوبت اشباع، ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی) استفاده شدند.

در این پژوهش، دو سن مختلف نشا شامل ۳۵ و ۴۵ روزگی به‌عنوان تیمارهای شبیه‌سازی در نظر گرفته شد. همان‌طور که در کشت نشائی واقعی، نشاها معمولاً تحت شرایط بهینه رشد داده می‌شوند به‌منظور تعیین مقادیر اولیه متغیرهای رشدی، مدل رشد چغندر قند ابتدا به‌صورت مستقل برای هر یک از این سن‌ها

در این مطالعه از مدل (Van Laar et al. 1997) برای شبیه‌سازی رشد و عملکرد اندام ذخیره‌ای چغندر قند استفاده شد. در مدل SUCROS، میزان تجمع ماده خشک تابعی از تابش، دما و ویژگی‌های فیزیولوژیک گیاه است. اساس محاسبات بر مبنای نرخ فتوسنتز برگ‌ها در سطح تاج پوشش است که خود به مقدار انرژی تابشی جذب‌شده توسط برگ‌ها بستگی دارد. برای محاسبه جذب تابش خورشید از قانون بیر استفاده می‌شود. ماده خشک تولیدشده پس از کسر تنفس نگهداری به رشد اندام‌های گیاه اختصاص می‌یابد (Spitters et al. 1989). توزیع کربوهیدرات‌ها بین اندام‌های مختلف بر اساس ضرایب تخصیص در مراحل فنولوژیکی مختلف انجام می‌شود. تعادل آب خاک در مدل با در نظر گرفتن تبخیر و تعرق، زه‌کشی، روان‌آب و جذب آب توسط ریشه‌ها محاسبه می‌شود و معادله پنمن-مونتیث برای برآورد تبخیر و تعرق مرجع به‌کار می‌رود. نسبت تعرق واقعی به تعرق پتانسیل به‌عنوان شاخصی برای تأثیر تنش آبی در مدل لحاظ شده است (Goudriaan and Van Laar 1994). این مدل پیش‌تر برای شرایط ایران و شرایط مختلف مدیریتی (مانند تاریخ و فصل کاشت، تراکم گیاهی، سن نشا و رژیم‌های آبیاری)

و تحت شرایط رشد پتانسیل اجرا گردید به‌طوری‌که فرض شد گیاه در مرحله اولیه رشد تحت شرایط بهینه دما و نور و بدون هیچ‌گونه تنش زیستی و غیرزیستی رشد کرده است. در این مرحله اولیه شبیه‌سازی، مقادیر وزن خشک اندام‌های مختلف گیاه شامل پهنک‌برگ‌ها، دم‌برگ‌ها، ریشه‌ها و اندام‌های ذخیره‌ای، به‌همراه شاخص سطح برگ اولیه برآورد و به‌عنوان پارامترهای اولیه و ورودی مدل در شبیه‌سازی اصلی رشد مورد استفاده قرار گرفتند (جدول ۱). سن نشاها در این مطالعه به‌عنوان شاخصی از وضعیت فیزیولوژیک گیاه در زمان انتقال لحاظ شده و مستقل از شیوه‌ی فیزیکی تولید نشا یا جزئیات اجرایی آن در مدل اعمال گردیده است.

به‌منظور مقایسه، تیمار کاشت مستقیم نیز به‌عنوان روش رایج در مناطق مورد مطالعه لحاظ شد. هر سه سیستم کاشت مستقیم، کشت نشائی ۳۵ روزه و کشت نشائی ۴۵ روزه در تاریخ

کاشت متداول هر منطقه شبیه‌سازی شدند. تاریخ‌های متداول بر اساس مشاوره با مراکز ترویج محلی تعیین شد. تمامی شبیه‌سازی‌ها با پارامترهای یکسان در شرایط محدودیت آب و بدون محدودیت غذایی یا تنش غیرزیستی انجام شد. آبیاری واقعی بر اساس الگوی محلی (زمانی که رطوبت خاک به حدود ۷۰ درصد ظرفیت زراعی می‌رسد) در مدل اعمال شد. روش زمان‌بندی آبیاری براساس درصد رطوبت خاک نسبت به ظرفیت زراعی یکی از روش‌های پذیرفته‌شده در مدیریت آبیاری است و در منابع استاندارد مانند FAO (Allen et al. 1998) توصیف شده است؛ بدین‌صورت که آبیاری در حدود ۶۵ تا ۷۵ درصد ظرفیت زراعی رطوبت خاک انجام می‌شود تا از استرس آبی گیاه جلوگیری و مصرف آب بهینه گردد. سایر عملیات زراعی مانند عمق خاک‌ورزی، تراکم بوته (۱۰ بوته در مترمربع) و فاصله ردیف‌ها (۵۰ سانتی‌متر) ثابت بودند.

جدول ۱ پارامترهای اولیه برای دو سن نشا چغندرقد که از آزمایش شبیه‌سازی اولیه به دست آمدند.

Table 1 Initial model parameters for two transplant ages derived from the first simulation set.

سن نشا Age of seedling (day)	وزن خشک اولیه پهنک‌برگ‌ها Initial dry weight of the leaves (g m ⁻²)	وزن خشک اولیه دم‌برگ‌ها Initial dry weight of the petioles (g m ⁻²)	وزن خشک اولیه ریشه‌ها Initial dry weight of the roots (g m ⁻²)	وزن خشک اولیه اندام‌های ذخیره‌ای Initial dry weight of storage organs (g m ⁻²)	شاخص سطح برگ اولیه Initial leaf area index
35	1.8	0.81	1.84	0.39	0.03
45	5.19	2.5	5.45	1.82	0.10

مدل هستند. مقدار مدل‌شده وزن خشک کل از رابطه ۲ زیر محاسبه گردید:

$$TDW_{\text{model}} = e^{(a+bt+ct^2+dt^3)} \quad \text{رابطه ۲}$$

نرخ رشد نسبی (RGR) به‌صورت مشتق لگاریتمی TDW مدل‌شده محاسبه شد و نرخ رشد محصول (CGR) با استفاده از رابطه ۳ به صورت زیر به‌دست آمد (Hunt, 2012):

$$CGR = RGR \times TDW_{\text{model}} \quad \text{رابطه ۳}$$

نرخ رشد نسبی بیانگر افزایش وزن خشک در واحد وزن موجود در واحد زمان و نرخ رشد محصول نشان‌دهنده‌ی افزایش ماده خشک در واحد سطح زمین و زمان است. به‌منظور تحلیل تغییرات شاخص سطح برگ در طول فصل رشد، مدل سیگموئیدی

به‌منظور بررسی شاخص‌های رشدی چغندرقد تحت دو روش کشت نشائی و مستقیم در مناطق مختلف، از وزن خشک کل گیاه (TDW؛ گرم در مترمربع) و شاخص سطح برگ (LAI) در فواصل زمانی معین طی فصل رشد استفاده شد. داده‌ها بر اساس روز پس از کاشت برای هر تیمار (ترکیب منطقه × سیستم کشت) تنظیم گردید.

برای توصیف روند تغییرات تجمع ماده خشک در طول زمان، از مدل چندجمله‌ای درجه سوم برای لگاریتم وزن خشک کل (رابطه ۱) استفاده شد:

$$\ln(TDW) = a + bt + ct^2 + dt^3 \quad \text{رابطه ۱}$$

که در آن (t) زمان (روز پس از کاشت)، و a، b، c و d ضرایب

لجستیک (رابطه ۴) بر داده‌های مشاهده شده برازش داده شد (Tsialtas and Maslari, 2005):

$$\text{رابطه ۴} \quad LAI = \frac{K}{1 + e^{-r(t_0 - t)}}$$

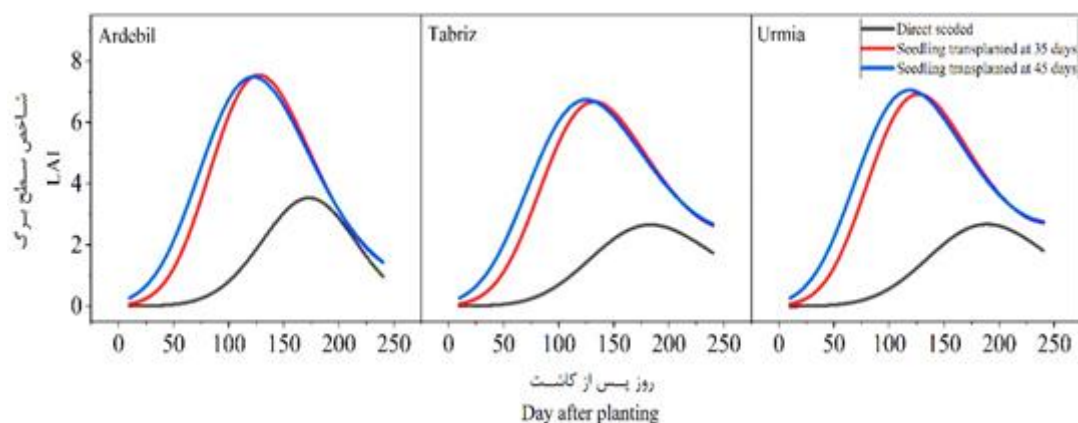
که در آن K حداکثر مقدار LAI ، r نرخ رشد نسبی LAI و t_0 زمان میانه رشد برگ است. پارامترهای K ، r و t_0 برای هر تیمار (ترکیب منطقه × سیستم کشت) به صورت مستقل و به عنوان پارامترهای آزاد مدل با استفاده از برازش غیرخطی مدل لجستیک به داده‌های مشاهده شده LAI برآورد شدند و هیچ مقدار ثابتی از پیش برای این پارامترها در نظر گرفته نشد.

لازم به ذکر است که تمامی شبیه‌سازی‌ها برای هر منطقه در بازه طولانی ۱۳۵۸ تا ۱۳۹۸ انجام شده و برازش توابع چندجمله‌ای و لجستیک بر روی خروجی مدل به منظور استخراج شاخص‌های رشدی پیوسته و قابل مقایسه بین تیمارها بوده است. هدف از این برازش‌ها، تمرکز بر الگوهای کلی رشد و روندهای فصلی بوده و حذف نوسانات کوتاه‌مدت روزانه و بین‌سالی تنها در حدی بوده که تفسیر شاخص‌های رشدی را آسان‌تر سازد. برازش مدل‌ها با استفاده از روش حداقل مربعات در محیط نرم‌افزار R و با توابع lm و nls انجام شد. داده‌های شاخص سطح برگ در فواصل زمانی حدود ۱۰ روز در طول فصل رشد اندازه‌گیری و برای برازش مدل استفاده شدند. شاخص‌های رشدی و پارامترهای مدل برای هر منطقه و سیستم کشت محاسبه و میانگین آن‌ها برای مقایسه‌ی تیمارها مورد استفاده قرار گرفتند. منحنی‌های LAI ، TDW ، RGR و CGR نشان‌دهنده‌ی روند میانگین بین‌سالی خروجی مدل در دوره ۱۳۵۸ تا ۱۳۹۸ هستند. این منحنی‌ها با هدف نمایش الگوهای کلی رشد و تفاوت‌های نسبی سیستم‌های کشت ترسیم شده‌اند و برای استنباط آماری مستقیم بین منحنی‌ها مورد استفاده قرار نگرفته‌اند. ارزیابی

معنی‌داری تفاوت‌ها بر اساس تحلیل آماری متغیر انتهایی «عملکرد ریشه» انجام شده است. برای هر منطقه، داده‌های عملکرد حاصل از شبیه‌سازی سالانه طی دوره ۱۳۵۸ تا ۱۳۹۸ به صورت یک سری زمانی برای هر سامانه کشت در نظر گرفته شد. به منظور بررسی تغییرات بلندمدت عملکرد، روند سالانه با استفاده از مدل رگرسیون خطی سری زمانی (شامل شیب روند) تحلیل گردید و معنی‌داری روند با آزمون مقدار p ارزیابی شد. مقایسه سامانه‌های کشت نیز بر اساس اختلاف در سطح و شیب روند در مدل سری زمانی انجام گرفت. ترسیم نمودارها با استفاده از نرم‌افزار OriginPro9.1 انجام شد.

نتایج و بحث

در تمام تیمارها مقدار LAI از مراحل ابتدایی رشد (۱۰ تا ۳۰ روز پس از کاشت) به صورت تدریجی افزایش یافت و پس از حدود ۱۲۰ روز به حداکثر مقدار خود رسید، سپس به تدریج کاهش یافت. در منطقه اردبیل، مقدار LAI در کشت مستقیم در ابتدا بسیار پایین (حدود ۰/۰۲۸ در روز دهم) بود و در نشاکاری ۴۵ روزه به طور چشمگیری بیشتر شد (۰/۲۶۶) (شکل ۲). در روز ۱۲۰ام، LAI در تیمار کشت مستقیم ۱/۶۲ و در نشاکاری‌های ۳۵ و ۴۵ روزه به ترتیب ۷/۴۴ و ۷/۴۷ بود. بیشترین مقدار LAI در این منطقه در حدود ۱۳۰ روز پس از کاشت و در تیمار نشاکاری ۳۵ روزه (۷/۵۳) مشاهده شد. در تبریز نیز حداکثر مقدار LAI مربوط به نشاکاری ۳۵ روزه (۶/۶۶ در روز ۱۳۰) و کمترین آن مربوط به کشت مستقیم (حدود ۳/۳۶ در روز ۱۶۰) بود. در منطقه ارومیه، مقدار LAI در تیمار نشاکاری ۴۵ روزه در روز ۱۲۰ به حداکثر ۷/۰۵ رسید و در ادامه کاهش یافت.

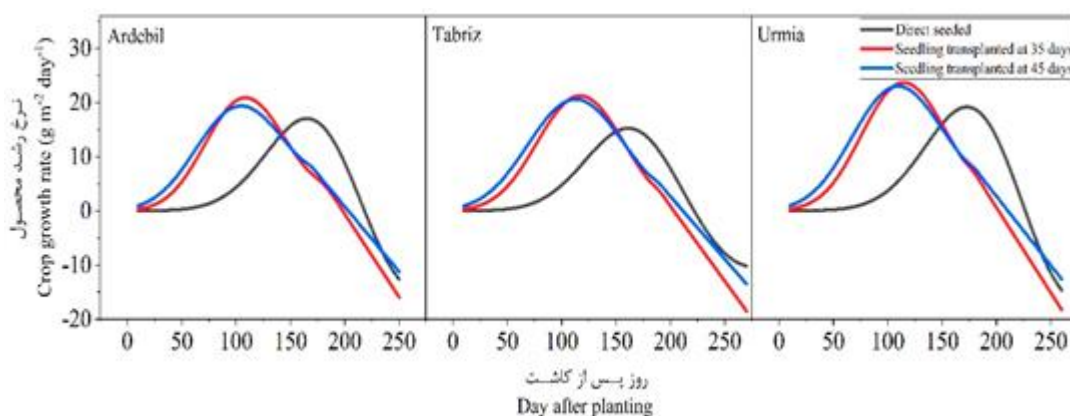


شکل ۲ شاخص سطح برگ (LAI) چغندر قد در مناطق و سیستم‌های کشت‌های مستقیم و نشاکاری در طول فصل رشد. خطوط نشان‌دهنده میانگین مقادیر شبیه‌سازی شده ۴۰ ساله هستند.

Fig 1 Leaf area index (LAI) of sugar beet in locations and direct seeded and seedling transplanted systems. Lines represent the 40-year mean simulated values.

(۲۴۰ روز) به حدود ۸/۸- رسید که نشان‌دهنده کاهش خالص رشد در انتهای فصل است (شکل ۳). در تبریز، روند مشابهی دیده شد به طوری که بیشترین CGR در نشاکاری ۳۵ روزه در حدود ۲۱ گرم بر مترمربع در روز، در روز ۱۲۰ مشاهده شد. در ارومیه، CGR در نشاکاری ۴۵ روزه حتی از این مقدار نیز فراتر رفت و در روز ۱۲۰ به ۲۲/۳ گرم بر مترمربع در روز رسید.

تغییرات CGR نشان داد که این شاخص از آغاز رشد تا حدود ۶۰ روز پس از کاشت روندی افزایشی داشت و پس از رسیدن به بیشینه مقدار در حدود ۱۱۰ تا ۱۳۰ روز، کاهش یافت. در منطقه اردبیل، CGR در تیمار نشاکاری ۴۵ روزه از ۰/۹۵ در روز دهم به بیش از ۱۹/۲ گرم بر مترمربع در روز در روز ۱۰۰ رسید و سپس در روز ۱۵۰ مقدار ۱۱/۷ و در پایان فصل رشد

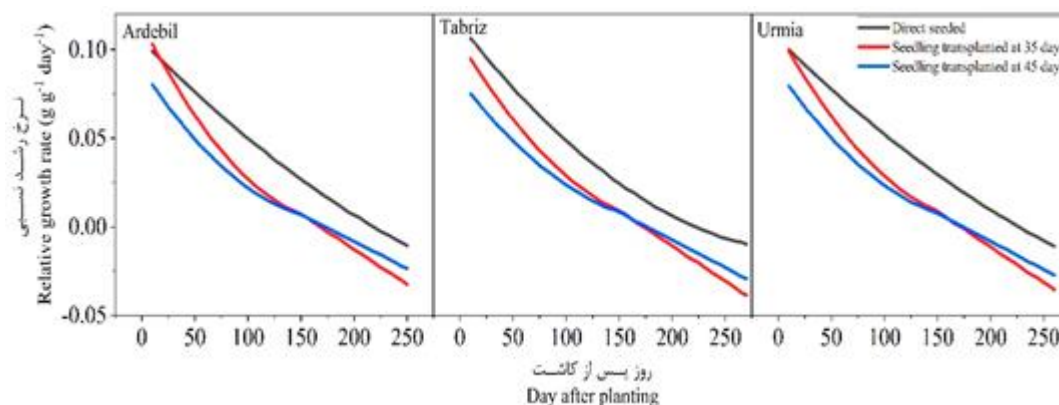


شکل ۳ نرخ رشد محصول (CGR) چغندر قد در مناطق و سیستم‌های کشت‌های مستقیم و نشاکاری در طول فصل رشد. خطوط نشان‌دهنده میانگین مقادیر شبیه‌سازی شده ۴۰ ساله هستند.

Fig 3 Crop growth rate (CGR) of sugar beet in locations and direct seeded and seedling transplanted systems. Lines represent the 40-year mean simulated values.

مقدار RGR در نشاکاری ۴۵ روزه به حدود ۰/۰۲۲ و در پایان فصل (روز ۲۴۰) به ۰/۰۲- رسید. الگوی مشابهی در تبریز ارومیه نیز مشاهده شد؛ اما کاهش RGR در ارومیه کندتر بود که نشان‌دهنده استمرار رشد فعال‌تر برگ‌ها در این منطقه است.

مقادیر RGR در آغاز فصل رشد (روز ۱۰) در همه تیمارها بالا بود و بین ۰/۰۷۵ تا ۰/۱۰۶ گرم بر گرم در روز متغیر بود. در اردبیل، مقدار RGR در نشاکاری ۳۵ روزه در روز ۱۰ برابر با ۰/۱۰۳ و در نشاکاری ۴۵ روزه ۰/۰۸ بود (شکل ۴). با پیشرفت رشد، این شاخص روندی کاهشی داشت، به‌طوری‌که در روز ۱۰۰

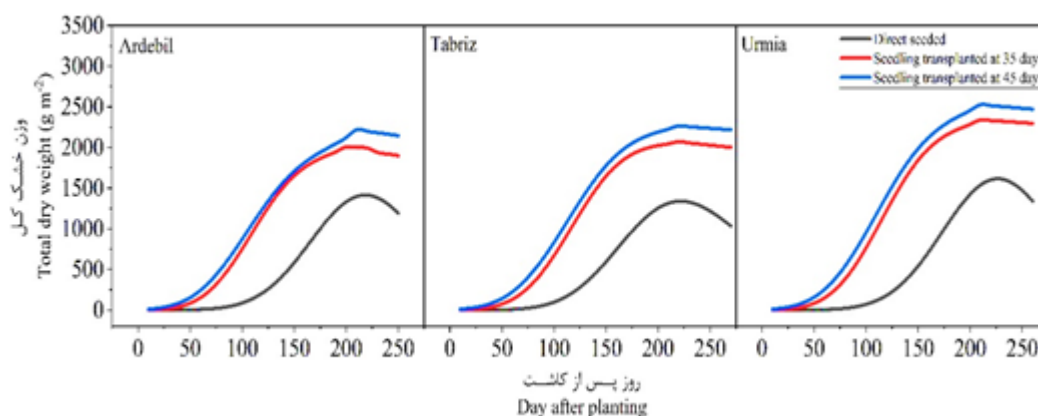


شکل ۴ نرخ رشد محصول (RGR) چغندر قند در مناطق و سیستم‌های کشت‌های مستقیم و نشاکاری در طول فصل رشد. خطوط نشان‌دهنده میانگین مقادیر شبیه‌سازی شده ۴۰ ساله هستند.

Fig. 4 Relative growth rate (RGR) of sugar beet in locations and direct seeded and seedling transplanted systems. Lines represent the 40-year mean simulated values.

۱۷۰ افزایش یافت. در نشاکاری ۴۵ روزه، مقدار TDW در همان زمان به حدود ۱۹۰۲/۳ کیلوگرم بر مترمربع رسید. در تبریز، مقادیر TDW در نشاکاری ۳۵ روزه در پایان فصل حدود ۲۰۰۱/۱ و در ارومیه در نشاکاری ۴۵ روزه به بیش از ۲۴۷۱ کیلوگرم بر متر مربع رسید.

روند TDW کل نشان داد که تا حدود ۱۷۰ تا ۱۸۰ روز پس از کاشت، افزایش پیوسته‌ای در هر سه منطقه وجود داشت و سپس به تدریج روند کندی در افزایش مشاهده شد. در اردبیل، مقدار TDW در تیمار کشت مستقیم از حدود ۰/۱۱ کیلوگرم بر مترمربع در روز ۱۰ به حدود ۹۱۸/۵ کیلوگرم بر متر مربع در روز

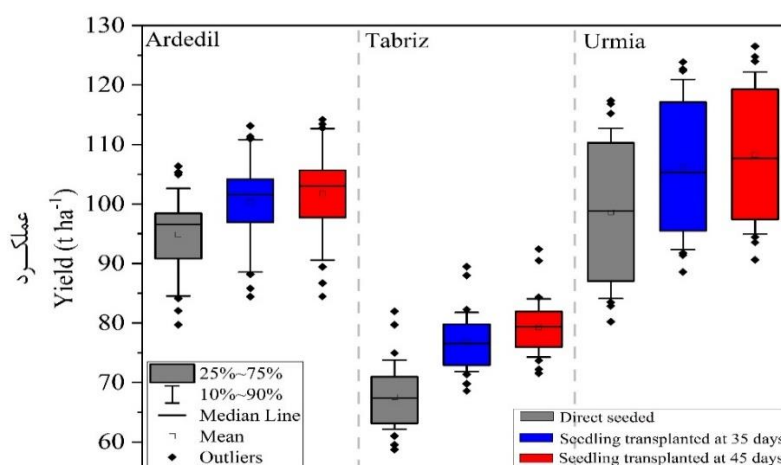


شکل ۵ وزن خشک کل (TDW) چغندر قند در مناطق و سیستم‌های کشت‌های مستقیم و نشاکاری در طول فصل رشد. خطوط نشان‌دهنده میانگین مقادیر شبیه‌سازی شده ۴۰ ساله هستند.

Fig. 5 Total dry weight (TDW) of sugar beet in locations and direct seeded and seedling transplanted systems. Lines represent the 40-year mean simulated values.

مستقیم تبریز با میانگین حدود ۶۸ تن در هکتار به دست آمد. در منطقه اردبیل، عملکرد ریشه بین ۸۲ تا ۱۱۴ تن در هکتار متغیر بود و تیمار نشاکاری ۴۵ روزه حدود ۷/۲ درصد بیشتر از کشت مستقیم محصول تولید کرد (شکل ۶).

نتایج حاصل از بررسی عملکرد ریشه چغندر قند در سه منطقه اردبیل، تبریز و ارومیه نشان داد که روش و سن نشا تأثیر قابل توجهی بر میزان عملکرد ریشه داشت. در مجموع، بالاترین عملکرد ریشه در تیمار نشاکاری ۴۵ روزه در ارومیه با میانگین حدود ۱۰۸ تن در هکتار و کمترین عملکرد ریشه در کشت



شکل ۶ عملکرد ریشه چغندر قند در مناطق و سیستم‌های کشت مستقیم و نشاکاری در طول فصل رشد.

Fig 6 Root yield of sugar beet in locations and direct seeded and seedling transplanted systems.

نشان داد که در اردبیل تغییرات سالانه معنی‌دار نبود ($p > 0.14$) و شیب حداکثر ۰/۱۵ تن در هکتار در سال، در حالی که در تبریز و ارومیه روند عملکرد در همه سامانه‌ها کاهشی و از نظر آماری بسیار معنی‌دار بود ($p < 0.001$)؛ به طوری که شیب کاهش سالانه بین ۰/۲۰ تا ۰/۲۷ تن در هکتار در تبریز و حدود ۰/۵۵ تا ۰/۶۰ تن در هکتار در ارومیه برآورد شد. جزئیات آماری کامل شامل میانگین، انحراف معیار، دامنه تغییرات، شیب روند و سطح معنی‌داری در جدول ۲ ارائه شده است.

در تبریز، نشاکاری ۴۵ روزه نسبت به کشت مستقیم حدود ۱۷/۳ درصد افزایش عملکرد ریشه داشت و در ارومیه نیز این افزایش بین ۶/۸ تا ۱۴ درصد در سال‌های مختلف شبیه‌سازی متغیر بود. به طور میانگین در سه منطقه، نشاکاری ۳۵ روزه و ۴۵ روزه به ترتیب باعث افزایش ۸/۵ و ۱۰/۸ درصدی عملکرد ریشه نسبت به کشت مستقیم شدند. در میان مناطق به طور میانگین در سیستم‌های مختلف کشت، بیشترین میانگین عملکرد ریشه به ارومیه (حدود ۱۰۴ تن در هکتار) و کمترین به تبریز (حدود ۷۴ تن در هکتار) تعلق داشت. بررسی روند بلندمدت نیز

جدول ۲ شاخص‌های آماری و روند ۴۰ ساله عملکرد چغندر قند در مناطق مختلف و سامانه‌های کشت مستقیم و نشاکاری. مقادیر نشان‌دهنده میانگین، حداقل، حداکثر، انحراف معیار (SD)، شیب روند سالانه و معنی‌داری آزمون روند (p-value) هستند.

Table 2 Forty-year statistical indicators and yield trend of sugar beet across locations and direct-seeded and seedling-transplanted systems. Values represent the mean, minimum, maximum, standard deviation (SD), annual trend slope, and the significance level (p-value) for the yield time series.

منطقه Location	سیستم System	میانگین Mean (t ha ⁻¹)	انحراف معیار SD (t ha ⁻¹)	کمینه Minimum (t ha ⁻¹)	بیشینه Maximum (t ha ⁻¹)	شیب Slope (t ha ⁻¹ yr ⁻¹)	سطح معنی‌داری روند p-value (trend)
Ardebil	Direct seeded	94.8	6.3	79.7	106.3	0.086	0.3443
Ardebil	Seedling transplanted at 35 days	100.3	6.9	84.4	113.1	0.139	0.1635
Ardebil	Seedling transplanted at 45 days	101.7	7.3	84.5	114.2	0.151	0.1458
Tabriz	Direct seeded	67.5	5.1	58.7	81.9	-0.271	0.00003
Tabriz	Seedling transplanted at 35 days	76.7	4.4	68.6	89.5	-0.222	0.00014
Tabriz	Seedling transplanted at 45 days	79.3	4.4	71.6	92.4	-0.201	0.00069
Urmia	Direct seeded	98.6	11.3	80.2	117.4	-0.597	0.00005
Urmia	Seedling transplanted at 35 days	106.2	10.8	88.6	123.9	-0.555	0.00009
Urmia	Seedling transplanted at 45 days	108.3	10.6	90.6	126.5	-0.552	0.00008

به‌طور کلی، روند تغییرات نشان داد که نشاکاری به‌ویژه در سنین ۳۵ تا ۴۵ روزه موجب استقرار سریع‌تر و رشد برگ گسترده‌تر نسبت به کشت مستقیم شد که در نهایت منجر به افزایش فتوسنتز، CGR و تجمع ماده خشک گردید. این افزایش چشمگیر نشان‌دهنده اثر مثبت نشاکاری بر رشد رویشی، کارایی مصرف تابش و افزایش عملکرد زیستی گیاه است. در زمینه RGR پایین بودن این شاخص در سیستم‌های نشاکاری در مقایسه با سیستم کشت مستقیم بخاطر وزن خشک بیشتر نشاها و در نتیجه هزینه بالای تنفسی آن در مقایسه در کشت مستقیم است. اختلاف‌ها در عملکرد ریشه در مناطق مختلف به تفاوت شرایط اقلیمی، دما، تابش و طول فصل رشد مرتبط است. به‌طور کلی، نشاکاری به‌ویژه در سن ۴۵ روزه موجب استقرار بهتر گیاه، رشد سریع‌تر اولیه، افزایش شاخص سطح برگ (LAI)، بهبود نرخ رشد محصول (CGR) و تجمع بیشتر ماده خشک کل (TDW) گردید که در نهایت منجر به افزایش معنی‌دار عملکرد ریشه چغندر قند شد.

چنین روندی با یافته‌های گزارش‌شده در چغندر قند و سایر گیاهان زراعی نیز سازگار است؛ به‌عنوان نمونه، در چغندر قند، روش نشاکاری نسبت به کشت مستقیم باعث افزایش LAI و

تجمع ماده خشک شده است به‌طوری‌که نشاکاری در این روش، منجر به مقادیر بالاتر LAI و تولید بیشتر ماده خشک نسبت به کشت مستقیم گزارش شده است (Pahlaviani Miandoab et al. 2022). افزون بر این، در گیاهانی مانند کنگر فرنگی (*Cynara scolymus*) نیز گزارش شده است که نشاکاری منجر به رشد رویشی قوی‌تر، LAI بالاتر و افزایش بازده زیستی و اقتصادی می‌شود (Leskovar and Othman 2021). این شواهد نشان می‌دهد که نشاکاری از طریق بهبود رشد اولیه، افزایش هدایت فتوسنتزی و کارایی استفاده از تابش، می‌تواند سهم مهمی در افزایش ظرفیت تولید ماده خشک داشته باشد. در زمینه چغندر قند، در شمال چین گزارش شده است که نشاهای چغندر قند با ۳۵-۴۰ روز بالاترین عملکرد ریشه را داشته است به‌طوری‌که عملکرد ریشه ۱۰/۴ تا ۱۳/۶ درصد بیشتر از نشاهای ۲۵ روزه گزارش شده است. همچنین توصیه شده است که برای دستیابی به افزایش قابل‌توجه عملکرد، کشت چغندر قند نشائی باید پیش از ۱۹ فروردین انجام شود و نشاها به‌مدت ۳۵-۴۰ روز در گلخانه پرورش یابند (Zhu et al. 2020). در مطالعه مشابهی در مصر نیز گزارش شد که کشت نشاکاری چغندر قند موجب افزایش عملکرد ریشه (۱۲ درصد) و کارایی مصرف آب (۵۳)

درصد) و کاهش نیاز آبی به میزان ۲۷ درصد نسبت به کشت مستقیم شد (Moursy and El-Kady 2019).

در خصوص RGR، مشاهده RGR پایین‌تر در گیاهان نشاکاری‌شده نسبت به کشت مستقیم پدیده‌ای قابل انتظار است زیرا گیاهان بزرگ‌تر یا دارای جرم خشک اولیه بیشتر (مانند نشاها) معمولاً به دلیل هزینه تنفسی بالاتر برای نگهداری بافت، RGR کمتری نسبت به گیاهان کوچک‌تر نشان می‌دهند. این رابطه در مبنای فیزیولوژی رشد و نیز برخی مطالعات تجربی تأیید شده است (Rezazadeh et al. 2021). تفاوت‌های عملکرد بین مناطق مختلف نیز عمدتاً به شرایط اقلیمی، شامل دما، شدت تابش و طول فصل رشد بازمی‌گردد. مرورها و فراتحلیل‌های در محصولات ردیفی مثل برنج (*Oryza sativa*) به‌روشنی نشان داده‌اند که اختلاف میان نشاکاری و کشت مستقیم به‌شدت وابسته به محیط، مدیریت و خصوصیات اقلیمی است (Poojitha et al. 2024). در مجموع، یافته‌های این مطالعه همسو با گزارش‌های موجود نشان می‌دهد که نشاکاری از طریق بهبود استقرار، افزایش رشد اولیه، توسعه سطح برگ و تجمع ماده خشک، می‌تواند موجب بهبود معنی‌دار شاخص‌های رشد و در نهایت افزایش عملکرد در سامانه‌های زراعی شود (Leskovar and Othman 2021; Rezazadeh et al. 2021).

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، ارزیابی دقیق اثرات نشاکاری بر رشد و عملکرد چغندرقد در سه منطقه مختلف نشان داد که انتقال نشا یک مزیت واقعی در مراحل آغازین رشد ایجاد می‌کند. این مزیت در قالب افزایش زود هنگام شاخص سطح برگ (LAI) و وزن خشک کل (TDW) در مراحل ابتدایی فصل رشد نسبت به کشت مستقیم مشاهده شد عاملی که نهایتاً به بهبود رقابت گیاه با

تنش‌های محیطی و افزایش توان فتوسنتزی در طول فصل منجر شد. هرچند نرخ رشد نسبی به دلیل وزن اولیه بالاتر نشاها کمتر به نظر می‌رسید، اما این موضوع از نظر فیزیولوژیکی طبیعی است و اثر منفی بر عملکرد ریشه نداشت بلکه رشد اولیه قوی‌تر عملاً این کاهش نسبی را جبران کرد. بررسی منطقه‌ای نیز نشان داد تفاوت عملکرد ریشه بیشتر به شرایط آب‌وهوایی هر منطقه برمی‌گردد، برای مثال ارومیه با برخورداری از شرایط اقلیمی مناسب، بالاترین عملکرد ریشه را داشت، در حالی که تبریز به دلیل محدودیت‌های اقلیمی، عملکرد ریشه پایین‌تری نشان داد. در مجموع، نتایج پژوهش به‌روشنی بیان می‌کند که نشاکاری، خصوصاً با نشاهای ۳۵ تا ۴۵ روزه، می‌تواند یک استراتژی کارآمد برای افزایش حدود ۸ تا ۱۱ درصدی عملکرد ریشه چغندرقد باشد، به‌ویژه در شرایطی که سبز شدن یکنواخت، استقرار مناسب بذر یا شرایط هوایی ابتدای فصل چالش‌برانگیز است. این یافته‌ها نشان می‌دهد تغییر رویکرد از کشت مستقیم به استفاده هدفمند از نشا می‌تواند بخشی از راه حل افزایش پایداری و اطمینان در تولید چغندرقد در مناطق متنوع اقلیمی باشد. همچنین، مطالعات آینده می‌توانند با گنجاندن مناطق با اقلیم‌ها و عرض‌های جغرافیایی متنوع، دامنه کاربرد نتایج را گسترش دهند.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

سپاسگزاری

نویسندگان از سازمان هواشناسی کشور برای فراهم نمودن داده‌های اقلیمی مناطق مورد بررسی کمال قدردانی را دارند.

References

منابع مورد استفاده

- Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO. Irrigation and drainage paper 56. 1998; FAO, Rome, 300(9), p.D05109.
- Ben-Gal A, Shani U. Yield, transpiration and growth of tomatoes under combined excess boron and salinity stress. *Plant and Soil*. 2002; 247(2): 211-221. **Doi:** <https://doi.org/10.1023/A:1021556808595>
- Cheshmi M, Khajeh-Hosseini M, Gheshm R, Asadi S. Improving sugar beet yield, quality, and water use efficiency by nursery and transplanting practice under semi-arid conditions. *Agronomy Journal*. 2023; 115(2): 781-800. **Doi:** <https://doi.org/10.1002/agj2.21282>
- Deihimfard R, Rahimi-Moghaddam S, Chenu K. Risk assessment of frost damage to sugar beet simulated under cold and semi-arid environments. *International Journal of Biometeorology*. 2019; 63 (4): 511–521. **Doi:** <https://doi.org/10.1007/s00484-019-01682-5>.
- Deihimfard R, Rahimi-Moghaddam S, Goudriaan J, Damghani AM, Noori O, Nazari S. Can optimizing the transplant of sugar beet by age and date enhance water productivity in arid and semi-arid climates?. *Field Crops Research*. 2021; 271. **Doi:** <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108266>
- Evans GC. The quantitative analysis of plant growth. Blackwell Scientific Publications, Oxford. 1972.
- Goudriaan J, Van Laar HH. Modelling potential crop growth processes: textbook with exercises, Springer – Science+ Business Media, B.V. 1994.
- Guo C, Yang C, Fu J, Song Y, Chen S, Li H, Ma C. Effects of crop rotation on sugar beet growth through improving soil physicochemical properties and microbiome. *Industrial Crops and Products*. 2024; 212. **Doi:** <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.118331>
- Hunt R. Basic growth analysis: plant growth analysis for beginners, Springer Science and Business Media, Dordrecht, 2012; pp. 112. **Doi:** <https://doi.org/10.1007/978-94-010-9117-6>
- Ivanina V, Shapovalenko R, Strilets O, Senchuk S. Sugar beet fertilisation for sustainable yield under climate change conditions. *Zemdirbyste-Agriculture*. 2021;108(4): 355-362. **Doi:** <https://doi.org/10.13080/z-a.2021.108.045>
- Khaembah EN, Nelson, WR. Transplanting as a means to enhance crop security of fodder beet. *BioRxiv*. 2016; **Doi:** <https://doi.org/10.1101/056408>
- Khozaei M, Haghighi AAK, Parsa SZ, Sepaskhah AR, Razzaghi F, Yousefabadi VA, Emam Y. Evaluation of direct seeding and transplanting in sugar beet for water productivity, yield and quality under different irrigation regimes and planting densities. *Agricultural Water Management*. 2020; 238. **Doi:** <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106230>
- Leskovar DI, Othman YA. Direct Seeding and transplanting influence root dynamics, morpho-physiology, yield, and head quality of globe artichoke. *Plants*. 2021; 10(5): 899. **Doi:** <https://doi.org/10.3390/plants10050899>
- Mansouri H, Hassani M, Hamze H, Jafari AM, Yosefabadi VA, Chaharmahali M. Comparing the quantitative, qualitative and economic yield of sugar beet planting by root transplanting method with direct seeding in Hamedan region. *Journal of Sugar Beet*. 2021; 37(1): 49-60. (in Persian with English abstract) **Doi:** <https://doi.org/10.22092/JSB.2022.353748.1268>
- Mirzaei MR, Abdollahian-Noghabi M. Study of sugar beet growth pattern in Hamedan, Iran. *Journal of Sugar Beet*. 2012; 27(2): 1-9. (in Persian with English abstract). **Doi:** <https://doi.org/10.22092/jsb.2012.662>
- Mohammadi-Ahmadm Mahmoudi E, Deihimfard R, Noori O. Yield gap analysis simulated for sugar beet-growing areas in water-limited environments. *European Journal of Agronomy*. 2020; 113. **Doi:** <https://doi.org/10.1016/j.eja.2019.125988>.

- Moursy MAM, El-Kady MS. Study planting methods to improve water use efficiency and productivity of sugar beet in a newly reclaimed area. *Life Science Journal*. 2019; 16(12): 11–19. **Doi:** <https://doi.org/10.7537/marslsj161219.02>.
- Pahlaviani Miandoab S, Dadashi M, Mir Mahmoudi T, Shahrooghbi A, Adjam Norouzi H. Investigating the effect of date and planting method (transplanting and direct-seeding) on quantitative and qualitative traits of sugar beet (*Beta vulgaris* L.). *Journal of Crop Ecophysiology*. 2022; 15(60): 575-592. (in Persian) **Doi:** <https://doi.org/10.30495/jcep.2022.689807>
- Peel MC, Finlayson BL, McMahon TA. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2007; 11(5): 1633-1644. **Doi:** <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>
- Poojitha K, Pravalika KM, Theerthana T, Prashanth DV. Transplanted v/s direct-seeded method of rice: A Review. *Journal of Experimental Agriculture International*. 2024; 46(5): 681-685. **Doi:** <https://doi.org/10.9734/jeai/2024/v46i52422>
- Radford PJ. Growth analysis formulae-their use and abuse. *Crop Science*. 1967; 7(3): 171-175. **Doi:** <https://doi.org/10.2135/cropsci1967.0011183X000700030001x>
- Rezazadeh S, Ilkaee M, Aghayari F, Paknejad F, Rezaee M. Growth, yield, nutrients uptake and anatomical properties of direct seeding and transplanting maize (*Zea mays* L.) plants under arbuscular mycorrhizal fungi and water stress. *Journal of Biological Research*. 2021; 94(1). **Doi:** <https://doi.org/10.4081/jbr.2021.8883>
- Spitters CJT, Van Keulen H, Van Kraalingen DWG. A simple and universal crop growth simulator: SUCROS87. pp. 147-181. In: Rabbinge R, Ward SA, Van Laar HH. (Eds.), *Simulation and Systems Management in Crop Protection*. Simulation Monograph 32. Center Agricultural Pub and Document, Wageningen. 1989.
- Tsialtas JT, Maslaris N. Leaf area estimation in a sugar beet cultivar by linear models. *Photosynthetica*. 2005; 43(3): 477-479. **Doi:** <https://doi.org/10.1007/s11099-005-0077-z>
- Van Laar HH, Goudriaan J, Van Keulen H. SUCROS97: Simulation of crop growth for potential and water-limited Production Situations. as applied to spring wheat. CABO-DLO, Wageningen. 1997.
- Zhu X, Han B, Song B, Yang J. Effect of extending seedling-raising period on yield of transplanting sugar beet (*Beta vulgaris*) in black soil area of Northeast China. *Sugar Tech*. 2020; 22 (6): 1103–1109. **Doi:** <https://doi.org/10.1007/s12355-020-00862-7>.