

## مقاله پژوهشی

# تشخیص ابعاد ریشه لوبیا در طول رشد با بسترهای کشت مختلف با استفاده از یک روش پردازش تصویر مرکب

محمود محمودی اشکفتکی<sup>۱\*</sup> و هادی عظیمی نژادیان<sup>۲</sup>

## چکیده

بعضی از بیماری‌های لوبیا به ریشه گیاه حمله می‌کنند و باعث زرد شدن ساقه و برگ‌های پایینی و سرانجام خشک شدن گیاه می‌شوند. از این رو مطالعه بر روی ریشه این گیاه بسیار با اهمیت است. اما مطالعه بلادرنگ ریشه، بدون استفاده از روش‌های هوشمند قابل انجام نخواهد بود. بنابراین در این تحقیق یک الگوریتم پردازش تصویر مرکب با استفاده از قطعه‌بندی تصاویر و ادغام مناطق به کمک الگوریتم ژنتیک توسعه داده شد. از ریشه‌ها در مراحل مختلف رشد و بسترهای مختلف پیت و پرلیت، خاک رس و ترکیب این مواد تصویربرداری شد. نتایج تشخیص و شناسایی ریشه در طی رشد با استفاده از الگوریتم پردازش تصویر مرکب نشان داد: (۱) بستر پیت و پرلیت تنها بستری بودند که روند رشد ریشه، با استفاده از الگوریتم پردازش تصویر، از روز دوم کشت قابل تشخیص بود. (۲) پارامترهای آماری محاسبه شده بین ریشه شناسایی شده با استفاده از الگوریتم مذکور و اندازه‌گیری شده به صورت دستی، دقت بالای الگوریتم را نشان داد ( $R^2 < 0.13$  و  $NRMSE < 0.99$ ). در ضمن نتایج نشان داد، ریشه‌های با حجم بزرگتر از  $20.8/68 \text{ cm}^3$  یا ریشه‌های با طول و عرض بیشتر از  $2/07 \text{ cm}$  و  $0/77 \text{ cm}$  توسط الگوریتم پردازش تصویر قابل شناسایی بودند. مدل‌سازی پارامترهای رشد حجمی، طولی و عرضی ریشه نشان داد، تغییرات حجم و عرض ریشه نسبت به زمان معادله نمایی و رشد طولی ریشه معادله توانی با زمان کشت دارد. دقت مدل‌های ایجاد شده در تخمین حجم ریشه، رشد طولی و عرضی ریشه بسیار مناسب بود، به طوری که  $R^2$ ،  $R^2$  تعدیل شده و RMSE بین داده‌های مشاهده شده و تخمین زده شده برای رشد حجمی ریشه به ترتیب برابر  $0/925$ ،  $0/902$  و  $45/57$ ، برای رشد طولی ریشه برابر  $0/944$ ،  $0/934$  و  $1/37$  و برای رشد عرضی ریشه برابر  $0/946$ ،  $0/937$  و  $0/96$  به دست آمدند.

**واژه‌های کلیدی:** ادغام مناطق، الگوریتم ژنتیک، پردازش تصویر، رشد ریشه، مدل‌سازی.

**ارجاع:** محمودی اشکفتکی م. و عظیمی نژادیان ه. ۱۴۰۰. تشخیص ابعاد ریشه لوبیا در طول رشد با بسترهای کشت مختلف با استفاده از یک روش پردازش تصویر مرکب. نشریه پژوهش‌های مکانیک ماشین‌های کشاورزی. ۲۱: ۲۷-۳۹.

۱- استادیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه چهرم.

۲- دانشجوی دکتری گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز.

\* نویسنده مسئول: [m.mahmoodi5@gmail.com](mailto:m.mahmoodi5@gmail.com)

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۲۰

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۲۹

## مقدمه

تبادلات ریشه گیاه با خاک دو طرفه بوده و در ایجاد تعادل تغذیه‌ای در گیاه و بهبود فعالیت میکروارگانیسم‌ها بسیار اثرگذار است. تیره‌های گیاهی مختلف، اثرات ویژه خود را دارند (Sofa *et al.*, 2020). در این میان خانواده حبوبات به لحاظ دارا بودن خصوصیات منحصر به فرد در ریشه، شاخص هستند. قابلیت تثبیت نیتروژن در ریشه حبوبات، آن‌ها را متمایز و مهم ساخته است. در مناطق سردسیر کشور، عمده حبوبات کشت شده مربوط به کشت انواع لوبیا، عدس و نخود است. سطح زیر کشت لوبیا در سال ۹۶-۹۷، ۷۲۴۱۷ هکتار و معادل ۰/۸۳٪ از کل سطح زیر کشت کشور بود. میزان لوبیای تولید شده نیز ۱۳۹۳۳۰ تن بود که معادل ۰/۲۲٪ از کل تولیدات است.

ریشه لوبیا قادر است به کمک باکتری‌های ریزوبیوم، نیتروژن هوا را تثبیت کند. تثبیت بیولوژیکی نیتروژن، نقش اکولوژیکی مهمی در حفظ منابع کافی نیتروژن در خاک دارد. در عین حال مقدار نیتروژن تثبیت شده لوبیا به عواملی چون رقم، گونه و نژاد باکتری ریزوبیوم و شرایط رشد، نیتروژن و برخی عناصر ریز مغذی خاک بستگی دارد. برای جوانه زدن لوبیا نیاز به دمای بیش از ۱۵ درجه سلسیوس است. دمای مورد نیاز برای رشد آن در روز ۲۸-۲۰ درجه و در شب ۲۰-۱۵ درجه سلسیوس است. عمق کاشت بذر لوبیا حدود ۵-۳ سانتی‌متر است. فاصله دو بوته در هر ردیف در ارقام پاکوتاه ۱۰ سانتی‌متر در نظر گرفته می‌شود. در ارقام پا بلند نیز ۴۰-۳۰ سانتی‌متر است (Kamel *et al.*, 2016).

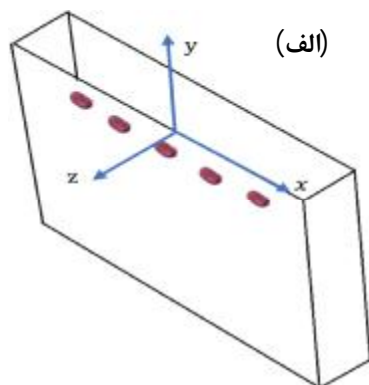
بیماری‌های گیاه لوبیا معمولاً به ریشه گیاه حمله می‌کنند و با زرد شدن ساقه و برگ‌های پایینی و سرانجام خشک شدن برگ‌ها همراه است. بیماری‌های مهم لوبیا شامل انواع پوسیدگی فوزاریومی ریشه، زردی فوزاریومی، پوسیدگی رایزوکتونایی ریشه و بیماری‌های ویروسی مانند ویروس موزائیک معمولی لوبیا و ... هستند. معمولاً بیماری پوسیدگی فوزاریومی ریشه لوبیا در اکثر مناطق زیر کشت این محصول در دنیا وجود دارد. اولین علائم بیماری یک تا دو هفته بعد از کاشت به صورت خطوط باریک کشیده قرمز روی هیپوکوتیل و ریشه گیاهچه‌های لوبیا ظاهر می‌شوند. سپس ریشه‌های اولیه و ثانویه مورد حمله قرار گرفته و تمام اندام‌های ریشه از بین می‌رود که نتیجه آن از بین رفتن بوته است. بنابراین مطالعه بلادرنگ

ریشه گیاه لوبیا با روش‌های تصویربرداری می‌تواند کمک زیادی به کشاورزان بکند (Kamel *et al.*, 2016).

ریشه گیاه در خاک با بعضی از مواد موجود در بستر خاک هم‌رنگ است، در ضمن خاک، کاملاً اطراف ریشه‌ها را می‌گیرد. به همین دلیل شناسایی آن به راحتی و با الگوریتم‌های پردازش تصویر معمولی قابل انجام نخواهد بود. یکی از روش‌های متداول برای شناسایی شیء هدف در یک تصویر روش قطعه‌بندی تصویر است که به منظور شناسایی بهتر شیء هدف می‌تواند با روش‌های دیگر ادغام شود. قطعه‌سازی بر اساس آستانه گذاری رایج‌ترین روش پردازش تصویر است که در تحقیق‌های مختلف استفاده شده است (Gonzalez & Woods, 2008; Mahmoodi- Eshkaftaki & Houshyar, 2021). انتخاب آستانه برای شناسایی شیء هدف می‌تواند به روش (Mahmoodi- Otsu) (Mahmoodi & Ebrahimi, 2019) و بهینه سازی آستانه با استفاده از الگوریتم ژنتیک (Mahmoodi-Eshkaftaki *et al.*, 2019) انجام گیرد. روش آستانه گذاری بر پایه وضوح موجود در تصویر بنا می‌شود و در تصاویر با تعداد اشیاء زیاد و وضوح کم دچار ضعف است. برای چنین تصاویر پیچیده و وضوح پایین استفاده از روش‌های بهینه سازی مانند الگوریتم ژنتیک می‌تواند بسیار کارآمد باشد (Kussener, 2011; Panwar & Gulati, 2013). آنها از تابع انرژی مربوط به مرزهای فعال به عنوان تابع برازش در الگوریتم ژنتیک استفاده کردند. استفاده از مرزهای فعال در تصاویری مهم می‌شوند که وضوح مرزها مناسب باشد، به طوری که تمایز خاصی بین زمینه و شیء هدف باشد. به همین خاطر محققین به دنبال روشی بودند که بر روی اکثر تصاویر قابل استفاده باشد، بنابراین ادغام مناطق مختلف تصویر که شدت روشنایی‌ها و ویژگی‌های مشابه دارند حائز اهمیت است. در پژوهش‌هایی، Zanuty & Ghiduk (2013) و Kamdi & Krishna (2012) با استفاده از روش ادغام مناطق تصویر به شناسایی مناطق آسیب دیده یا تومور در تصاویر MRI پرداختند و با استفاده از الگوریتم ژنتیک ادغام مناطق تصویر را بهینه کردند. آنها یک تابع برازش جدید پیشنهاد کردند. جمعیت اولیه خود را بر اساس داده‌های تصادفی از سرتاسر تصویر انتخاب کردند. در ضمن هر کروموزوم پیشنهادی آنها شامل سه بخش بود، ژن‌های کنترل، ژن‌های سطوح خاکستری و ژن‌های مکان. هر ژن وابسته به شدت روشنایی در مکان

بعد  $z$  که غیر قابل تصویربرداری است در راستاهای  $x$  و  $y$  اتفاق بیافتد. به این طریق روند رشد ریشه به‌خوبی تصویربرداری شد.

در هر گلدان ۲۰ لوبیا که از سه روز قبل خیس خورده بودند، کشت شد. همه لوبیاهای رشد کردند و مطالعه بر روی آنها انجام گرفت. گلدان‌ها سه روز یک بار آبیاری شدند و روند رشد ریشه، روزانه تصویربرداری شد. تصاویر از فاصله ۲۰ cm گلدان‌ها گرفته شد و پس از ذخیره بر روی حافظه دوربین به کامپیوتر منتقل و بررسی شدند. به‌منظور مطالعه رشد ریشه، خواص ریخت‌شناسی ریشه شامل بیشترین رشد طولی و عرضی ریشه، مساحت ریشه، محیط ریشه، حجم ریشه و ... اندازه‌گیری شد. از لوبیاهای هر سه روز یک بار دو عدد از گلدان خارج و طول، عرض و حجم ریشه به‌صورت دستی اندازه‌گیری شد.



شکل ۱- گلدان ساخته شده جهت تصویربرداری از نمای جانبی ریشه؛ (الف) شماتیک گلدان و موقعیت لوبیاهای کاشته شده؛ (ب) تصویر ریشه لوبیا حین رشد

### پردازش تصویر

روش قطعه‌بندی تصویر با ادغام بخش‌های تصویر روش  $k$ -means، یک روش کاربردی برای تقسیم پیکسل‌های تصویر به دسته‌های مختلف است و براساس

انتخابی بود. در الگوریتم ادغام مناطق از این مقادیر به عنوان مقادیر پایه برای پیدا کردن مقادیر دقیق هر ژن کنترل استفاده می‌شود. در ادغام مناطق، مناطق با شدت روشنایی نزدیک به هم، در هم ادغام می‌شوند. برای شناسایی مناطق اولیه به منظور ادغام می‌توان از الگوریتم  $k$ -means استفاده نمود (Gholami-Doborjeh, 2012).

مدلسازی ریشه گیاهان از سالیان دور مورد توجه محققان بوده است (Bruns & Croy, 1985) و معمولاً مدل‌های رگرسیونی با دقت بالایی توانسته‌اند پارامترهای مربوط به ریشه را پیش‌بینی کنند (Yang *et al.*, 2017). این روش‌ها مخرب بودند و پس از اندازه‌گیری پارامترهای مورد نظر، ریشه از بین می‌رفت. این مشکل باعث افزایش استفاده از روش‌های غیرمخرب در شناسایی ریشه گیاهان شد. در سال‌های اخیر چندین تحقیق در زمینه شبیه‌سازی ریشه گیاهان در خاک با استفاده از روش‌های پردازش تصویر به‌عنوان روش‌های غیر مخرب انجام گرفته است (Leitner *et al.*, 2010; Schluter *et al.*, 2018). در این تحقیق‌ها مشکل اصلی در شناسایی و شبیه‌سازی ریشه‌ها، وضوح نزدیک ریشه‌ها و خاک بیان شده است. بنابراین در این تحقیق، به منظور طراحی یک استراتژی برای شناسایی ریشه و تعیین ابعاد آن در خاک این اهداف دنبال خواهد شد: (۱) ساخت گلدان‌های مناسب جهت تصویربرداری از نمای جانبی ریشه در حین رشد و شناسایی ریشه با استفاده از یک الگوریتم پردازش تصویر مرکب به کمک الگوریتم ژنتیک؛ (۲) اندازه‌گیری خواص ریخت‌شناسی ریشه لوبیا و حجم آن در روزهای مختلف رویش و مدل‌سازی پارامترهای موثر بر رشد ریشه بر حسب زمان.

### مواد و روش‌ها

#### محیط کشت

مطالعه روی ریشه لوبیای قرمز انجام گرفت. لوبیاهای عمق ۳ تا ۵ سانتی‌متری سطح خاک کشت شدند. سه بستر متفاوت خاک، پیت و پرلیت و مخلوط خاک و پیت و پرلیت برای کشت لوبیاهای انتخاب شد.

به منظور کشت لوبیاهای با قابلیت تصویربرداری از نمای جانبی سه گلدان دو جداره از جنس شیشه ساخته شد (شکل ۱). فاصله دیواره‌ها از هم ۵ cm بود. فاصله کم دو دیواره گلدان موجب می‌شود رشد ریشه بجای حرکت در

وجود نوفه و حالات خاص تصویر، ممکن است مناطقی با تعداد پیکسل کم وجود داشته باشد. مناطق کوچک با تعداد پیکسل کمتر از ۵ پیکسل با مناطق نزدیک به خود به کمک یک الگوریتم ژنتیک ادغام شدند و به این ترتیب بعضی از مناطق نامناسب از بین رفتند.

### ادغام کردن با استفاده از الگوریتم ژنتیک

یک فرایند ادغام تکاملی بر روی تصویر قطعه بندی شده برچسب خورده اعمال شد تا مناطق نامناسب در بررسی‌ها حذف شوند. در استفاده از الگوریتم ژنتیک در این تحقیق سه مرحله انتخاب مدل کدکننده کروموزوم مؤثر، انتخاب یک تابع برازش مناسب و استفاده از یک الگوریتم قوی وجود داشت که شامل موارد زیر بودند (شکل ۲):

- انتخاب جمعیت اولیه، برابر تعداد تکه‌های اولیه تصویر؛
- تولید مثل با جفت‌گیری دو والد که بر اساس مقادیر شایستگی‌شان با استفاده از چرخ رولت<sup>۱</sup> انتخاب شدند.
- عمل تقاطع بر روی دو والد انجام شد تا نتاج (فرزند) جدید بوجود آید.
- عمل جهش نیز بر روی نتاج اعمال شد تا از بهینه‌های محلی فاصله بگیرند.
- مقادیر شایستگی برای هر دو نتاج محاسبه شد و فرآیند به مرحله ۲ رفته تا همه اشخاص برای جمعیت جدید ایجاد شوند.
- جمعیت بعدی با جمعیت جدید جایگزین شد.
- اگر شرایط نهایی فراهم شود، اشخاص با بهترین صلاحیت استخراج شده و فرایند متوقف می‌شود و اگر شرایط نهایی مناسب نبود به مرحله ۲ برمی‌گردد.

برای انتخاب اینکه کدام همسایه برای ادغام شدن بهترین بود، فاصله عدم تجانس بین یک منطقه و همه همسایه‌هایش به‌طور جداگانه محاسبه شد. فاصله عدم تجانس بر اساس واریانس مناطق پایه‌ریزی شده است. به این ترتیب اگر واریانس دو منطقه مجاور نزدیک باشند، آنها برگزیده برای ادغام شدن هستند. بنابراین، فاصله واریانس‌ها بین یک منطقه و منطقه‌های مجاورش محاسبه شد. فاصله عدم تجانس به‌وسیله محاسبه فاصله اقلیدسی<sup>۲</sup> بین واریانس‌های هر منطقه و همسایه‌هایش تعیین گردید.

روش هیستوگرام کار می‌کند. به این صورت که پیکسل‌ها را بر اساس شدت روشنایی به دسته‌های مختلف تقسیم‌بندی می‌کند. الگوریتم k-means پیکسل‌هایی را که ویژگی‌های مشابهی دارند در یک گروه قرار می‌دهد. در تکرار اول k-means یک تعدادی از پیکسل‌ها را به‌طور تصادفی به عنوان مرکز بخش‌های جداسازی شده انتخاب می‌کند. نتیجه نهایی، چندین دسته را نشان می‌دهد که یک جداسازی خاص در هیستوگرام دارند. در این تحقیق جداسازی تصویر در بخش k-means در چهار مرحله انجام گرفت.

مرحله اول: انتخاب K تعداد به‌عنوان مقادیر اولیه  $V_k$  برای هر تصویر با ۲۵۶ سطح خاکستری (معادله (۱)):

$$V_k = \frac{256}{k+1}, \quad k = 1, \dots, K. \quad (1)$$

مرحله دوم: انتخاب پیکسل  $x$  به عنوان عضو کلاس  $Z$  طبق معادله (۲)، اگر فاصله بین این پیکسل و مرکز کلاس  $Z$  کوچک‌تر از فاصله آن با مراکز دیگر کلاس‌ها باشد.  $x_g$  شدت پیکسل  $x$  را نشان می‌دهد.

$$x \in C_j \text{ if } |x_g - V_j| \leq |x_g - V_i| \quad (2)$$

For  $i=1,2, \dots, k$  and  $i \neq j$

مرحله سوم: محاسبه مجدد مراکز کلاس‌ها ( $V_k$ ) برای کلاس‌های ( $C_k$ ) با استفاده از معادله (۳):

$$\text{New cluster center } (V_k) = \frac{1}{|C_k|} \sum_{s \in C_k} X_s, \quad (3)$$

$k = 1, \dots, K$

که  $s$  عضوی از  $C_k$  است،  $X_s$  سطح خاکستری پیکسل  $s$  است و  $|C_k|$  تعداد اعضای کلاس  $C_k$  است.

مرحله چهارم: شرایط نهایی وقتی حاصل می‌شود که مراکز  $V_k$  ثابت باقی بمانند. در غیر این صورت به مرحله دوم باز می‌گردد.

روش کلاس بندی k-means علی‌رغم کیفیت مناسب آن در قطعه سازی تصویر، نمی‌تواند یک شیء را به‌طور کامل از کل تصویر جداسازی نماید، زیرا تعدادی پیکسل در یک کلاس وجود دارد که به همدیگر متصل نیستند (Gholami-Doborjeh, 2012). بنابراین ممکن است تعداد کلاس‌هایی که بطور واقعی وجود دارد خیلی کمتر از کلاس‌های تعیین شده بوسیله k-means باشد. بنابراین برای برچسب گذاری پیکسل‌های متصل به‌صورت یک منطقه، از الگوریتم برچسب گذاری مولفه‌های متصل استفاده شد. پس از اینکه تصویر قطعه بندی شده اولیه با مناطق برچسب گذاری شده مجزا به دست آمد، به خاطر

1- Roulette Wheel

2- Euclidean distance

تابع برازش متشکل از فاصله واریانس‌های بین مناطق مجاور ادغام شده و مساحت منطقه ادغام شده مطابق معادله (۶) ایجاد شد.

$$F = \sum_{i=1}^N \frac{1}{d_i \times s_i}, \quad i = 1, \dots, N \quad (6)$$

که  $i$  شامل مناطق منتخب جهت ادغام و  $s_i$  مساحت مناطق حذف شده است.  $d_i$  فاصله اقلیدسی بین منطقه پاک شده و نزدیک‌ترین منطقه براساس واریانس منطقه است. مقادیر کم  $s_i$  و  $d_i$  برازش‌های مناسب‌تری ایجاد می‌کنند.

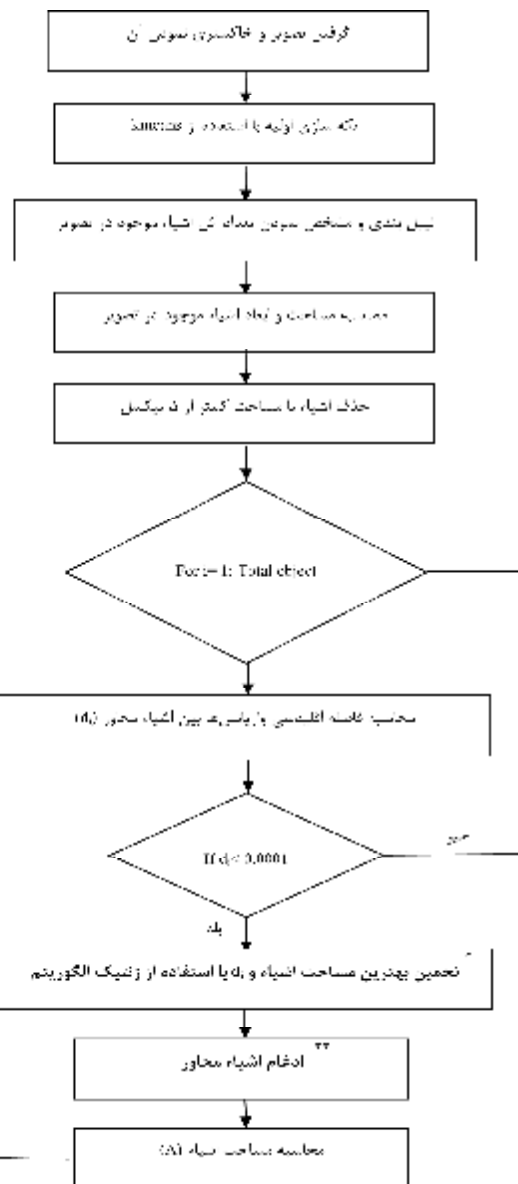
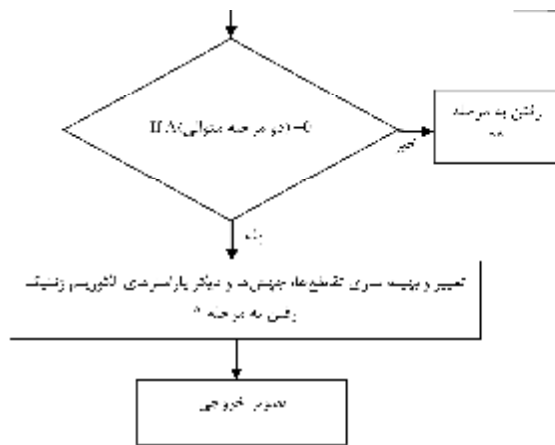
برای محاسبه واریانس منطقه مذکور، همه پیکسل‌های  $x$  از منطقه  $R$  در معادله (۴) قرار داده شدند.

$$\sigma_R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (g_i - \bar{g})^2}{g}, \quad \bar{g} = \frac{\sum g_i}{N}, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (4)$$

که  $\sigma_R^2$  واریانس منطقه  $R$  است و  $\bar{g}$  نقطه میانی شدت منطقه مذکور است.  $N$  تعداد پیکسل‌های منطقه مورد بررسی است. فاصله اقلیدسی بین واریانس دو منطقه نیز طبق معادله (۵) محاسبه شد.

$$d_i = \sqrt{(\sigma_{N_i}^2)^2 - (\sigma_{T_i}^2)^2} \quad (5)$$

که  $(\sigma_{N_i}^2)^2$  و  $(\sigma_{T_i}^2)^2$  واریانس مناطق  $T_i$  و همسایه‌های مجاور آن است.



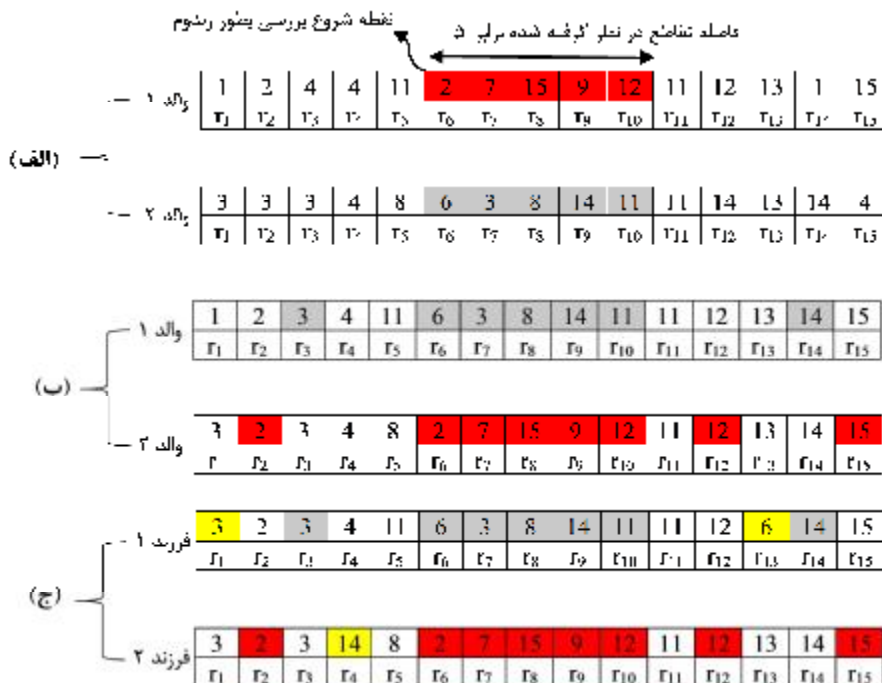
شکل ۲- فلوچارت مراحل قطعه سازی تصویر و ادغام مناطق با استفاده از الگوریتم ژنتیک

عمل تقاطع دو نقطه‌ای بر روی کروموزوم‌های انتخاب شده اعمال شد تا نسل جدید ایجاد شود. از طریق عمل تقاطع یک فاصله ثابت با یک نقطه شروع تصادفی برای فاصله انتخاب شد. طول فاصله تقاطع به تعداد مناطق جداسازی شده اولیه از تصویر قطعه بندی شده بستگی دارد. ژن‌های کامل فاصله تقاطع بین دو والد معاوضه می‌شوند، در نتیجه دو نسل تولید می‌شود. به منظور ثابت نگه داشتن امکان پذیری، ژن‌های با مقدار اشتباه باید بهنگام شوند. اگر تقاطع یک کروموزوم والد شامل مناطق ادغام شده با دیگر مناطق خارج از فاصله تقاطع باشد، وجود یک رابطه بین این مناطق اثبات خواهد شد. این رابطه باید در حین عمل تقاطع ثابت نگه داشته شود.

به منظور ایجاد کروموزوم جدید، ژن انتخاب شده باید بین دو والد معاوضه شود و سپس ژن‌هایی که از فاصله تقاطع استخراج می‌شوند و وابسته به این فاصله هستند باید با اعمال رابطه بین ژن‌ها بهنگام شوند. بنابراین می‌توان گفت تعداد کروموزوم‌ها برابر تعداد مناطق اولیه در مرحله قطعه‌سازی تصویر است. به عنوان نمونه در شکل ۳ (الف) اثر تقاطع بر روی یک تصویر با ۱۵ قطعه نشان داده شده است. تقاطع والد ۱ شامل ۵ ژن است که در آنها تکه‌های

عمل تقاطع دو نقطه‌ای بر روی کروموزوم‌های انتخاب شده اعمال شد تا نسل جدید ایجاد شود. از طریق عمل تقاطع یک فاصله ثابت با یک نقطه شروع تصادفی برای فاصله انتخاب شد. طول فاصله تقاطع به تعداد مناطق جداسازی شده اولیه از تصویر قطعه بندی شده بستگی دارد. ژن‌های کامل فاصله تقاطع بین دو والد معاوضه می‌شوند، در نتیجه دو نسل تولید می‌شود. به منظور ثابت نگه داشتن امکان پذیری، ژن‌های با مقدار اشتباه باید بهنگام شوند. اگر تقاطع یک کروموزوم والد شامل مناطق ادغام شده با دیگر مناطق خارج از فاصله تقاطع باشد، وجود یک رابطه بین این مناطق اثبات خواهد شد. این رابطه باید در حین عمل تقاطع ثابت نگه داشته شود.

به منظور ایجاد کروموزوم جدید، ژن انتخاب شده باید بین دو والد معاوضه شود و سپس ژن‌هایی که از فاصله تقاطع استخراج می‌شوند و وابسته به این فاصله هستند باید با اعمال رابطه بین ژن‌ها بهنگام شوند. بنابراین می‌توان گفت تعداد کروموزوم‌ها برابر تعداد مناطق اولیه در مرحله قطعه‌سازی تصویر است. به عنوان نمونه در شکل ۳ (الف) اثر تقاطع بر روی یک تصویر با ۱۵ قطعه نشان داده شده است. تقاطع والد ۱ شامل ۵ ژن است که در آنها تکه‌های



شکل ۳- عملیات تقاطع و جهش برای تصویر با ۱۵ منطقه اولیه، (الف) تقاطع اتفاق افتاده بین والدین، (ب) نتیجه عمل تقاطع، (ج) نتیجه عمل جهش

## پارامترهای اندازه‌گیری شده

به منظور بررسی دقت الگوریتم پردازش تصویر در شناسایی پارامترهای ریشه، هر سه روز یک بار از داخل گلدان‌ها دو ریشه استخراج شد و ابعاد ریشه‌ها با استفاده از خط‌کش و حجم ریشه‌ها به روش غرق کردن در آب اندازه‌گیری شد. مقادیر اندازه‌گیری شده به صورت دستی با مقادیر شناسایی شده با استفاده از پردازش تصویر مقایسه گردید.

## بررسی آماری

به منظور بررسی دقت الگوریتم پردازش تصویر مذکور در تعیین ابعاد ریشه لوبیا حین رشد، پارامترهای آماری خطای مطلق متوسط (MAE)، شاخص توافق (d)، انحراف معیار ( $s_d^2$ )، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) و ضریب همبستگی (R) بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شناسایی شده با استفاده از معادلات زیر محاسبه شدند.

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |P_i - O_i|}{n} \quad (8)$$

$$d = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n [(P_i - O_{avg}) + (O_i - O_{avg})]^2} \right] \quad (9)$$

$$s_d^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)}{n})^2}{n-1} \quad (10)$$

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}}{O_{avg}} \quad (11)$$

$$R = \frac{n \sum_{i=1}^n O_i P_i - \sum_{i=1}^n O_i \sum_{i=1}^n P_i}{\sqrt{[n \sum_{i=1}^n O_i^2 - (\sum_{i=1}^n O_i)^2][n \sum_{i=1}^n P_i^2 - (\sum_{i=1}^n P_i)^2]}} \quad (12)$$

در این معادلات  $O_i$ ،  $P_i$  و  $O_{ave}$  به ترتیب نشان دهنده مقادیر اندازه‌گیری شده، شناسایی شده و مقدار متوسط اندازه‌گیری شده هستند.

## نتایج و بحث

روند رشد ریشه‌ها در طول ۱۷ روز برای هر سه گلدان تصویربرداری شد و با استفاده از الگوریتم پردازش تصویر مذکور بررسی شد. نتایج نشان داد ریشه‌ها در بستر خاک رس با استفاده از الگوریتم قابل شناسایی نبودند. در حالی که در بستر مخلوط خاک و پیت و پرلیت پس از ۶ روز از کاشت قابل شناسایی بودند. این در حالی است که در

سطح (A): تعداد کل پیکسل‌های داخل تصویر ریشه از مقطع عرضی xy که واحد آن با استفاده از شابلون به واحد  $cm^2$  تبدیل شد.

محیط: تعداد کل پیکسل‌های اطراف ریشه در تصویر تبدیل شده به واحد cm؛

رشد طولی ریشه: طول محور اصلی بهترین بیضی برازش شده بر ریشه بر حسب cm است. در این تحقیق رشد ریشه در راستای محور x را مشخص می‌کند (شکل ۱).

رشد عرضی ریشه: طول محور فرعی بهترین بیضی برازش شده بر تصویر ریشه بر حسب cm است. در این تحقیق رشد ریشه در راستای محور y را مشخص می‌کند (شکل ۱).

قطر معادل ریشه: قطر دایره‌ای بر حسب cm که مساحت آن برابر با سطح ریشه در تصویر است.

سطح چندضلعی محاطی: سطح کوچک‌ترین چندضلعی بر حسب  $cm^2$ ، که تصویر ریشه را در خود محاط می‌کند.

وسعت: نسبت بین پیکسل‌های واقع در چندضلعی محاطی ریشه به پیکسل‌های کل تصویر؛

استحکام<sup>۱</sup>: نسبت بین پیکسل‌های واقع در سطح محاطی به پیکسل‌های واقع در تصویر ریشه (Grande, 2012)؛

حجم ریشه (V): برای این منظور تصاویر گرفته شده از نمای افقی به صورت لایه‌هایی با ضخامت یکسان (1 pixel =  $\Delta x$ ) تقسیم شدند، سپس هر لایه حول محور افقی اصلی خود دوران داده شد تا لایه‌ها به صورت دیسک‌های موازی استوانه‌ای شکلی تبدیل شوند. حجم هر دیسک برابر با [سطح آن دیسک  $\times$  ضخامت آن] و حجم کل ریشه برابر با مجموع حجم دیسک‌های تشکیل دهنده آن است (معادله (۷)). این روش که بنام روش لایه‌سازی و دوران لایه‌ها مطرح شده است تکمیل یافته روش‌های استفاده شده توسط دیگر محققین است (Bridge et al., 2007; Rashidi et al., 2008).

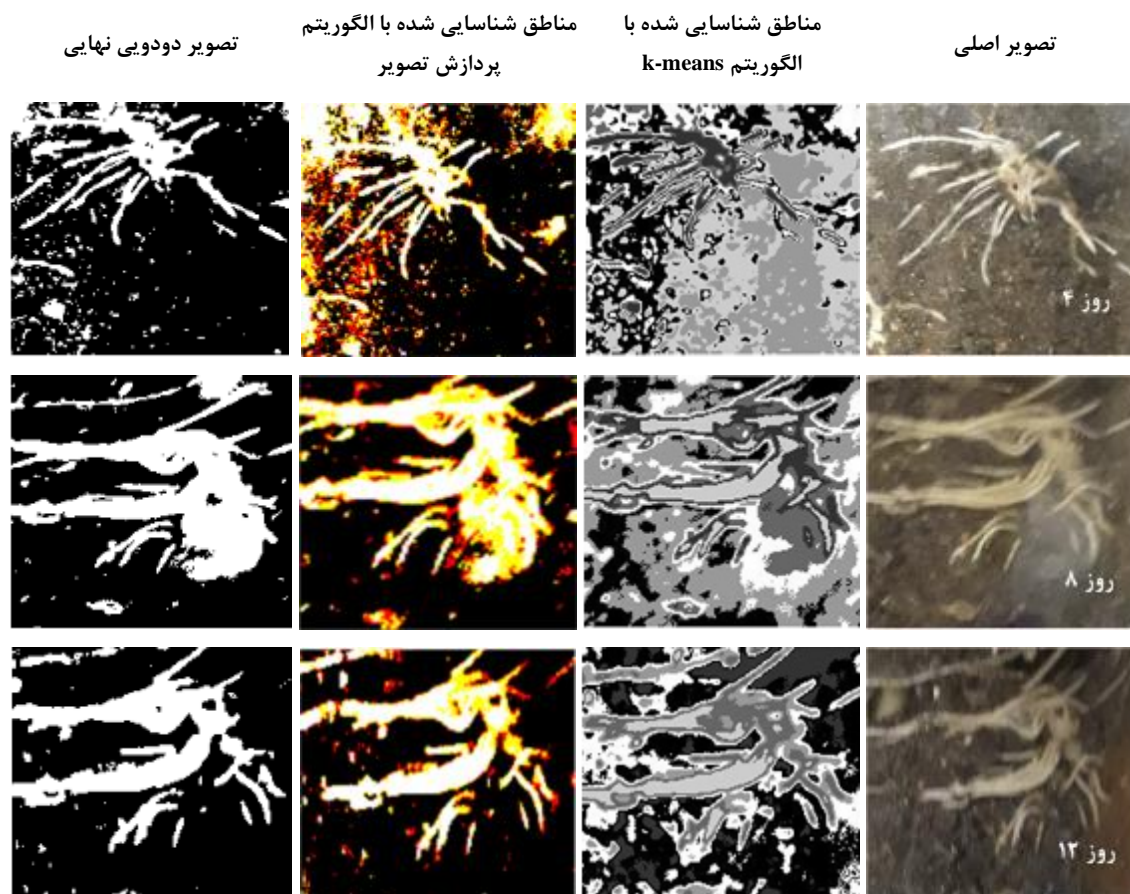
$$A_i = p \left( \frac{\Delta y}{2} \right)^2 \quad (7)$$

$$V_i = A_i \Delta x$$

$$V_{total} = \sum V_i$$

دیگر محققین هم استفاده شده است (Narisetti *et al.*, 2019). دقت شناسایی و جداسازی ریشه در روزهای ۴، ۸ و ۱۲ در شکل ۴ ارائه شده است. نتایج بررسی‌ها نشان داد روند رشد ریشه بعد از روز ۴، شکل یکنواختی پیدا کرده است و تنها حجم ریشه افزایش پیدا کرده است.

بستر پیت و پرلیت رشد ریشه از روز دوم به بعد قابل شناسایی و ردگیری بود. دلیل این اتفاق سیاه رنگ بودن بستر پیت و پرلیت است که موجب ایجاد بیشترین تمایز با ریشه می‌شود و به همین خاطر بهترین شناسایی را نشان می‌دهد. چنین بستری برای مطالعه ریشه گیاه توسط



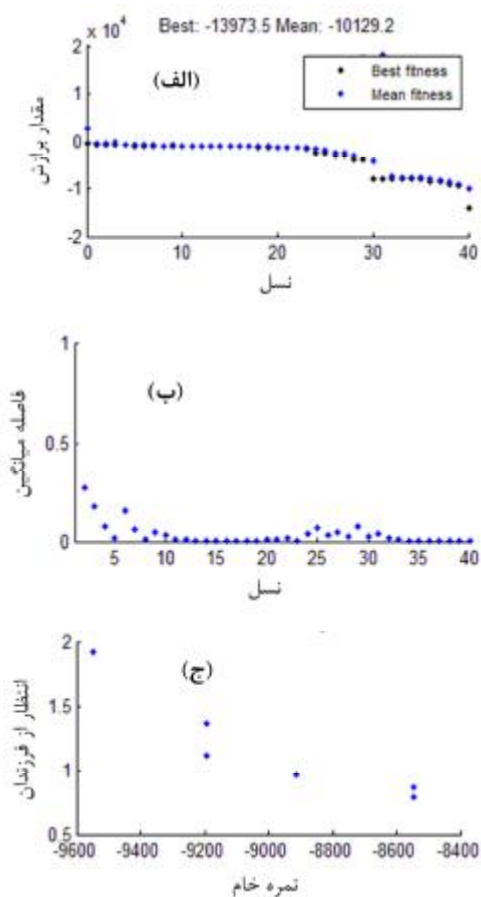
شکل ۴- تصویر اصلی ریشه در بستر پیت و پرلیت، تصویر طبقه بندی شده با الگوریتم k-means، ریشه استخراج شده با استفاده از الگوریتم پردازش تصویر مرکب و تصویر دودویی نهایی با پر کردن بعضی مناطق ریشه به منظور محاسبه خواص ریخت شناسی ریخت‌شناسی ریشه در طی روزهای مختلف از یک ریشه مشابه

گرفته بود و بنابراین بعضی از نمونه‌ها قابل تصویربرداری نبودند. نتایج حاصل از شناسایی مناطق مربوط به ریشه در جدول نشان می‌دهد که با استفاده از الگوریتم ژنتیک تعداد مناطق به شدت کاهش یافته و در حقیقت کارایی الگوریتم ژنتیک در متمرکز شدن مناطق بر روی منطقه ریشه را به خوبی نشان می‌دهد. همان‌طور که بیان شد تعداد کروموزوم‌ها در الگوریتم ژنتیک برابر تعداد مناطق انتخاب شده بوسیله الگوریتم k-means بود.

به‌منظور بررسی دقت الگوریتم طراحی شده در شناسایی ریشه‌ها در مراحل مختلف رشد، عملکرد الگوریتم در ادغام مناطق و کاهش مناطق شناسایی برای رسیدن به منطقه هدف که همان ریشه است در جدول ۱ ارائه شده است. همان‌طور که مشخص است الگوریتم در روزهای اول کشت دقت خوبی نداشته است، به‌طوری‌که حتی در روز اول تعداد اشیاء پس از استفاده از الگوریتم بیشتر هم شده است. با توجه به اینکه گلدان‌ها آبیاری می‌شدند حباب‌های هوا یا آب اطراف بعضی از ریشه‌ها را در حین تصویربرداری



پارامتر وسعت به‌خوبی نشان داد که در زمان شناسایی ریشه، سطح ریشه ۷۶٪ از کل فضای برش خورده از محدوده ریشه را شامل می‌شد در حالی که در روز ۱۷ این محدوده ۹۹/۶٪ از فضای برش خورده از محدوده ریشه بود. در ضمن پارامتر استحکام نیز از ۰/۳۳ در روز ۱ تا ۰/۸۷ در روز ۱۷ افزایش یافته که بیانگر افزایش فضای ریشه در منطقه برش خورده از عکس‌ها است.



شکل ۵- مقادیر تابع برازش (الف)، فاصله بین مناطق (ب) و تعداد فرزندان (ج) در نسل‌های مورد بررسی

تغییرات نسل‌ها و بهینه‌سازی آنها تا ۴۰ نسل مورد بررسی قرار گرفت. همان‌طور که در شکل ۵ دیده می‌شود مقدار تابع برازش با افزایش تعداد نسل کاهش یافته است (شکل ۵ الف). فاصله بین افراد (مناطق) نیز کمتر شده و به صفر نزدیک می‌شود (شکل ۵ ب). در ضمن تعداد فرزندان در هر نسل به هم نزدیکتر شده‌اند و نمره هر نسل افزایش یافته است (شکل ۵ ج). بنابراین الگوریتم ژنتیک به‌خوبی آموزش دیده است.

جدول ۱- تعداد نمونه‌های ریشه در بستر پیت و پرلیت همراه با تعداد اشیاء شناسایی شده در محوطه ریشه و تعداد اشیاء پس از استفاده از الگوریتم ژنتیک

روز	تعداد نمونه	میانگین تعداد اشیاء با استفاده از k-means	تعداد اشیاء پس از الگوریتم
۱	۱۳	۸۱	۱۱۹
۲	۱۶	۱۱۱	۴۸
۳	۱۸	۱۶۸	۱۶
۴	۱۵	۲۷۳	۵۶
۵	۱۶	۱۷۰	۹
۶	۱۵	۱۴۱	۱۹
۷	۱۳	۱۹۶	۱۰
۸	۱۲	۱۴۰	۱۹
۹	۱۲	۲۱۰	۱۷
۱۰	۱۰	۲۳۳	۲۳
۱۱	۱۱	۱۹۴	۱۸
۱۲	۱۰	۱۸۲	۷
۱۳	۷	۴۷	۱۸
۱۴	۷	۱۱۳	۹
۱۵	۶	۳۹	۲۱
۱۶	-	-	-
۱۷	۵	۵۹	۷

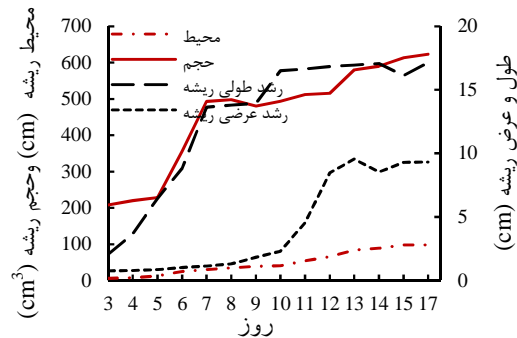
خلاصه آماری از پارامترهای اندازه‌گیری شده ریشه در جدول ۲ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ریشه‌های با مساحت بزرگتر از  $1 \text{ cm}^2$  قابل شناسایی بودند. به عبارتی ریشه‌های با طول و عرض بیشتر از  $0.77 \text{ cm}$  و  $2.07 \text{ cm}$  قابل شناسایی بودند. در زمان شناسایی ریشه توسط الگوریتم، حجم ریشه  $20.8/68 \text{ cm}^3$  بود.

جدول ۲- پارامترهای ریخت‌شناسی اندازه‌گیری شده از ریشه

پارامترهای آماری	مساحت ( $\text{cm}^2$ )	رشد طولی ریشه (cm)	رشد عرضی ریشه (cm)	وسعت	قطر معادل ریشه (cm)	استحکام	محیط (cm)	حجم ( $\text{cm}^3$ )
میانگین	۱۱/۵۱	۱۲/۸۳	۴/۲۷	۰/۹۱	۵/۴۵	۰/۵۲	۴۸/۸۶	۴۵/۰۷
محدوده	۴۸-۱	۱۷/۱۵-۲/۰۷	۹/۵۷-۰/۷۷	۰/۹۹۶-۰/۷۶	۹/۹۶-۱/۰۵	۰/۸۷-۰/۳۳	۹۸/۰۱-۵/۸۲	۶۲۳/۱۴-۲۰/۶۸
انحراف معیار	۱۱/۱۸	۵/۳۲	۳/۸۲	۰/۰۸	۳/۳۱	۰/۱۶	۳۲/۸۶	۱۴۵/۸۷
درجه اوج	۱۰/۷۹	-۰/۱۵	-۱/۸۴	-۰/۵۰	-۱/۸۶	۰/۰۲	-۱/۳	-۰/۶۴
چولگی	۳/۰۸	-۱/۱۴	۰/۵۱	-۰/۷۷	۰/۱۰	۰/۱۶	۰/۳۲	-۰/۸۵

## تخمین روند رشد ریشه

همانطور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود از روز ۱ تا ۱۷، ریشه رشد مناسبی داشته است. به طوری که حجم، طول، عرض و سایر پارامترهای ریشه به خوبی افزایش یافتند. در شکل ۶ روند تغییرات حجم، طول، عرض و محیط ریشه در روزهای مختلف رشد نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، حجم ریشه در روزهای ۵ تا ۷ به سرعت افزایش یافته است و سپس با شتاب کمتری افزایش رشد اتفاق افتاده است. رشد طولی ریشه از روز ۳ تا ۱۰ با شتاب انجام شده و بعد از آن شدت رشد کاهش یافته است در حالی که رشد عرضی ریشه در روزهای ۱۰ تا ۱۳ با شتاب بالایی اتفاق افتاده و در سایر روزها روند رشد آرام‌تر صورت گرفته است. محیط ریشه نیز به‌طور یکنواخت افزایش داشت. نتایج نشان داد روند رشد ریشه در کلیه پارامترها از روز ۱۳ به بعد آرام‌تر شده است. همین‌طور افزایش شتاب در رشد ریشه مخصوصاً رشد عرضی آن پس از خارج شدن ساقه از خاک که در روز ۶ اتفاق افتاده بود، بوقوع پیوست. این نتایج با یافته‌های دیگر محققین همخوانی داشت (Yang et al., 2017).



شکل ۶- روند رشد ریشه شامل پارامترهای حجم، محیط، طول و عرض ریشه حین رشد

پارامترهایی که برای رشد ریشه بیشتر استفاده می‌شوند، حجم، طول و عرض ریشه هستند. برای راستی آزمایی روش پردازش تصویر مذکور، مقادیر حجم، طول و عرض ریشه‌های خارج شده از خاک که به صورت دستی اندازه‌گیری شده بودند با مقادیر به دست آمده از روش پردازش تصویر مقایسه شدند. نتایج آماری در جدول ۳ نشان می‌دهد که دقت شناسایی ریشه توسط الگوریتم بسیار بالا بوده به طوری که MAE رشد طولی و عرضی کمتر از ۱ cm و حجم کمتر از ۱۱ cm<sup>3</sup> بود. این مقادیر در

مقایسه با محدوده هر کدام از این ویژگی‌ها بسیار ناچیز است. مقدار d بین مقادیر شناسایی شده و اندازه‌گیری شده نزدیک به ۱ بود که نزدیکی ویژگی‌های ریشه اندازه‌گیری شده و شناسایی شده را نشان می‌داد. مقدار  $s_d^2$  بین مقادیر شناسایی شده و اندازه‌گیری شده بسیار کم بود ( $s_d^2 > 0.0001$ ). همان‌طور که در جدول دیده می‌شود، NRMSE نیز بسیار کم نتیجه شده است که خطای کم بین مقادیر شناسایی شده و اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد. در ضمن  $R^2$  بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شناسایی شده بزرگتر از ۰/۹۹ بود. این مقادیر نشان می‌دهد الگوریتم پردازش تصویر مذکور به خوبی توانسته است ریشه را شناسایی و رشد آن را اندازه‌گیری کند. استفاده از روش‌های جدید پردازش تصویر در شبیه‌سازی ریشه گیاهان در سال‌های اخیر نتایج خوبی را رقم زده است. به طوری که با استفاده از این روش‌ها محققین توانسته‌اند ریشه گیاهان را به صورت سه بعدی و دو بعدی شبیه‌سازی کنند (Leitner et al., 2010; Schluter et al., 2018) و روند رشد ریشه را پیش بینی نمایند (Narisetti et al., 2019). هر چند دقت شبیه‌سازی ریشه در این تحقیق‌ها بالا بود، آنها از روش‌های پیشرفته پردازش تصویر و امواج ماوراء صوت استفاده کردند. به عنوان نمونه Schluter et al. (2018) به منظور شناسایی ریشه از اشعه X استفاده کردند و Leitner et al. (2010) از روش مدل‌سازی دینامیکی بر پایه L-Systems در شناسایی و شبیه‌سازی ریشه استفاده کردند.

## جدول ۳- دقت مقادیر اندازه‌گیری شده در برابر مقادیر

## شناسایی شده با استفاده از الگوریتم پردازش تصویر

پارامترهای آماری	رشد طولی ریشه	رشد عرضی ریشه	حجم
MAE	۰/۷۲۵	۰/۵۹۲	۱۰/۵۶۸
d	۰/۹۹۲	۰/۹۹۳	۰/۹۹۷
$s_d^2$	$> 0.0001$	$> 0.0001$	$> 0.0001$
NRMSE	۰/۰۷۷	۰/۱۲۶	۰/۰۳۳
$R^2$	۰/۹۹۰	۰/۹۹۹	۱

در بررسی روند رشد ریشه، مشخص کردن ارتباط بین حجم ریشه و سایر پارامترها می‌تواند به ما در بررسی رشد ریشه کمک زیادی کند. حجم ریشه اصلی‌ترین پارامتر در بررسی رشد ریشه است. معمولاً رشد ریشه را با تعیین طول و عرض ریشه‌ها به دست می‌آورند (Yang et al., 2017). در حالی که یک ریشه حین رشد طولی به صورت

قطر معادل محدوده ریشه دارد. نبود همبستگی معنی‌دار بین حجم ریشه و مساحت ریشه مسئله قابل تأملی است. دلیل این امر ممکن است رشد ریشه در راستای بعد سوم (راستای z مطابق شکل ۱) باشد که در سطح جانبی قابل اندازه‌گیری نیست.

شعاعی هم رشد می‌کند. بنابراین پارامتری مثل حجم ریشه، ویژگی مناسب‌تری برای تعیین رشد ریشه است. همبستگی بین ویژگی‌های اندازه‌گیری شده که در جدول ۴ ارائه شده است نشان داد، حجم ریشه همبستگی معنی‌داری در سطح ۱٪ با رشد طولی و عرضی ریشه، محیط و

جدول ۴- همبستگی بین پارامترهای ریخت‌شناسی اندازه‌گیری شده از ریشه

پارامترهای ریشه	مساحت	رشد طولی ریشه	رشد عرضی ریشه	وسعت	قطر معادل ریشه	استحکام	محیط	حجم
مساحت	۱							
رشد طولی ریشه	۰/۲۱۴ <sup>NS</sup>	۱						
رشد عرضی ریشه	۰/۰۰۱ <sup>NS</sup>	۰/۷۰۱ <sup>**</sup>	۱					
وسعت	-۰/۰۰۱ <sup>NS</sup>	۰/۳۲۴ <sup>NS</sup>	-۰/۴۰۰ <sup>NS</sup>	۱				
قطر معادل ریشه	-۰/۰۳۷ <sup>NS</sup>	۰/۸۳۳ <sup>**</sup>	۰/۹۴۲ <sup>**</sup>	-۰/۳۵۲ <sup>NS</sup>	۱			
استحکام	-۰/۳۴۳ <sup>NS</sup>	۰/۰۱۰ <sup>NS</sup>	۰/۳۱۲ <sup>NS</sup>	۰/۱۷۸ <sup>NS</sup>	-۰/۲۵۹ <sup>NS</sup>	۱		
محیط	-۰/۰۷۷ <sup>NS</sup>	۰/۸۲۳ <sup>**</sup>	۰/۹۵۱ <sup>**</sup>	-۰/۳۹۳ <sup>NS</sup>	-۰/۹۵۵ <sup>**</sup>	۰/۲۸۸ <sup>NS</sup>	۱	
حجم	-۰/۱۸۸ <sup>NS</sup>	۰/۹۶۰ <sup>**</sup>	۰/۷۶۶ <sup>**</sup>	-۰/۳۸۹ <sup>NS</sup>	-۰/۸۴۹ <sup>**</sup>	-۰/۰۸۱ <sup>NS</sup>	۰/۹۰۰ <sup>**</sup>	۱
<sup>NS</sup> معنی نبودن	<sup>**</sup> معنی داری در سطح ۱٪	<sup>**</sup> معنی داری در سطح ۱٪	<sup>**</sup> معنی داری در سطح ۱٪	<sup>**</sup> معنی داری در سطح ۱٪	<sup>**</sup> معنی داری در سطح ۱٪	<sup>**</sup> معنی داری در سطح ۱٪	<sup>**</sup> معنی داری در سطح ۱٪	<sup>**</sup> معنی داری در سطح ۱٪

۱/۳۷ به دست آمد و برای تخمین رشد عرضی ریشه (معادله (۱۵)) برابر ۰/۹۴۶، ۰/۹۳۷ و ۰/۹۶ شد. همان‌طور که مشخص است دقت مدل‌ها در تخمین ویژگی‌های مربوط به رشد ریشه بسیار موفق بود. به این ترتیب می‌توان بیان کرد که روند رشد ریشه لوبیا نسبت به گذشت زمان در اکثر مواقع معادله نمایی خواهد داشت که با تحقیقات محققین قبلی در مورد ریشه غلات همخوانی دارد (Dupuy et al., 2010).

یکی از مهمترین عواملی که رشد گیاه در مزرعه را با رشد گیاه در شرایط غیر مزرعه‌ای (گلدان) نزدیک و شبیه می‌کند، نوع محیط کشت و فضای کافی برای توسعه ریشه است. از طرفی ریشه‌ها باید امکان برهم‌کنش با یکدیگر را هم داشته باشند (Burgos-Artizzu et al., 2011) که در طراحی گلدان‌های این آزمایش این عوامل در نظر گرفته شده بود.

به‌طور کلی استفاده از روش‌های مرکب پردازش تصویر می‌تواند دقت شناسایی اشیاء را به‌خوبی بالا ببرد. همان‌طور که مشاهده شد دقت شناسایی ریشه لوبیا با استفاده از الگوریتم پردازش تصویر مذکور بسیار بالا و با روش‌های دستی قابل رقابت بود. بنابراین به‌خوبی می‌تواند جایگزین روش‌های مخرب در مسائل کشاورزی شود.

تعیین یک مدل مناسب برای تخمین رشد ریشه بر اساس زمان رشد در تحقیقات زیادی بررسی شده است. در این تحقیقات تغییر طول یا عرض ریشه را با استفاده از مدل‌های رگرسیونی توانی بر حسب زمان مدل کرده‌اند (Yang et al., 2017). البته عمده تحقیقات بر روی غلاتی مانند گندم انجام شده است (Bruns & Croy, 1985; Yang et al., 2017). قابل ذکر است روند رشد ریشه در بعضی تحقیقات، معادله نمایی با زمان نشان داده است (Dupuy et al., 2010). ما در این تحقیق مدل‌های مختلف لگاریتمی، نمایی، توانی، خطی و سینوسی با درجات مختلف بر روی داده‌های استخراج شده از ریشه‌ها برازش کردیم و در پایان دقیق‌ترین مدل‌ها برای تعیین روند رشد ریشه را بر حسب زمان برای رشد حجمی، طولی و عرضی ریشه، مطابق معادلات (۱۳) الی (۱۵) به دست آوردیم.

$$V(t) = 656.3 \exp(0.001069t) - 802.1 \exp(-0.1659t) \quad (13)$$

$$L(t) = -54.01t^{-0.6966} + 25.76 \quad (14)$$

$$W(t) = 10.07 \exp(-((x-15.18)/5.1)^2) \quad (15)$$

در این مدل‌ها t نشان دهنده زمان رشد ریشه بر حسب روز است. دقت مدل ۱۳ در تخمین حجم ریشه بسیار مناسب بود، به‌طوری‌که  $R^2$ ،  $R^2$  تعدیل شده و RMSE بین داده‌های مشاهده شده و تخمین زده شده به‌ترتیب برابر ۰/۹۲۵، ۰/۹۰۲ و ۴۵/۵۷ بود. این پارامترها برای تخمین رشد طولی (معادله (۱۴)) به‌ترتیب برابر ۰/۹۴۴، ۰/۹۳۴ و

## نتیجه‌گیری

در این تحقیق به منظور شناسایی ریشه لوبیا در بسترهای مختلف از یک الگوریتم پردازش تصویر دینامیکی به کمک الگوریتم ژنتیک استفاده شد. مقایسه نتایج حاصل از الگوریتم پردازش تصویر و نتایج واقعی، دقت این روش را در شناسایی ریشه در بستر پیت و پرلیت به خوبی نشان داد. کاهش تعداد مناطق مربوط به ریشه پس از استفاده از الگوریتم ژنتیک و رسیدن به منطقه ریشه و همچنین مقادیر تابع برازش، کاهش تعداد فرزندان، افزایش نمره هر نسل و کاهش فاصله بین مناطق، اثر بهبود شناسایی ریشه را در استفاده از الگوریتم ژنتیک به خوبی نشان داد. نتایج پردازش تصویر نشان داد که ریشه‌های با مساحت جانبی بزرگتر از  $1 \text{ cm}^2$  یا ریشه‌های با طول و عرض بیشتر از  $2/07 \text{ cm}$  و  $0/77 \text{ cm}$  توسط الگوریتم پردازش تصویر قابل شناسایی بودند. در زمان شناسایی ریشه، حجم ریشه‌ها بزرگتر از  $208/68 \text{ cm}^3$  بود. همبستگی بین خواص ریخت‌شناسی نشان داد، حجم ریشه به عنوان مهمترین پارامتر در اندازه‌گیری رشد ریشه همبستگی معنی داری در سطح ۱٪ با رشد طولی و عرضی ریشه، محیط و قطر معادل محدوده ریشه دارد. مدل‌سازی پارامترهای رشد حجمی، طولی و عرضی ریشه، مشخص کرد که معمولاً رشد ریشه معادله نمایی با زمان دارد. هدف اصلی از این تحقیق دست یابی به یک الگوریتم پردازش تصویر مناسب برای تشخیص ریشه در خاک بود که در این تحقیق برآورده شد. در ضمن استفاده از الگوریتم مذکور بر روی سه بستر پیت و پرلیت، خاک رس و مخلوط این مواد نشان داد که بستر پیت و پرلیت بهترین بستر برای مطالعه ریشه با استفاده از پردازش تصویر است.

## منابع

- maize fields. *Computers and Electronics in Agriculture*, 75(2): 337–346.
- Dupuy, L., Gregory, P. J., & Bengough, A. G. (2010). Root growth models: towards a new generation of continuous approaches. *Journal of Experimental Botany*, 61(8): 2131-2143.
- Gholami-Doborjeh, M. (2012). Genetic optimization for image segmentation. MSc Thesis, Eastern Mediterranean University, Gazimagusa, North Cyprus, pp. 45-90.
- Gonzalez, R., & Woods, R. (2008). *Digital Image Processing, Third Edition*. Pearson Prentice Hall. pp. 738-761.
- Grande, J. C. (2012). Principles of image analysis. *Metallography, Microstructure and analysis*, 1: 227-243.
- Kamdi, S., & Krishna, R. K. (2012). Image segmentation and region growing algorithm. *International Journal of Computer Applications in Technology*, 15: 13-20.
- Kamel, M., Shabiri, S. S., & Mohammadi, B. (2016). The technical guidelines of planting and harvesting beans and introduction of plant cultivars. Ministry of Agriculture, Agricultural Research, Education and Extension Organization, 1-27. (In Persian).
- Kussener, F. (2011). Active contour: A parallel genetic algorithm approach. *Proceedings of International Conference on Swarm Intelligence (ICSI 2011)*, Cergy, France, June 14-15.
- Leitner, D., Klepsch, S., Bodner, G., & Schnepf, A. (2010). A dynamic root system growth model based on L-Systems. *Plant Soil*, 332: 177–192.
- Mahmoodi-Eshkaftaki, M., & Ebrahimi, R. (2019). The effect of blade angle of turbine impellers on anaerobic digestion efficiency in stirred digesters. *Energy*, 178: 772–780.
- Mahmoodi-Eshkaftaki, M., & Houshyar, E. (2021). Determining volume and weight of quail eggs using image processing and artificial neural network techniques and comparing with regression models. *Journal of Researches in Mechanics of Agricultural Machinery*, 9(2): 23-34.
- Mahmoodi-Eshkaftaki, M., Haghghi, A., & Houshyar, E. (2019). Land suitability evaluation using image processing based on determination of soil texture–structure and soil features. *Soil Use and Management*, 00: 1–12. Doi: 10.1111/sum.12572.
- Narissetti, N., Henke, M., Seiler, C., Shi, R., Junker, A., Altmann, T., & Gladilin, E. (2019). Semi-automated root image analysis (saRIA). *Scientific Reports*, 9: 19674. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-55876-3>.
- Panwar, P., & Gulati, N. (2013). Genetic algorithms for image segmentation using
- Bridge, E. S., Boughton, R. K., Aldredge, R. A., Harrison, T. J. E., Bowman, R., & Schoech, S. J. (2007). Measuring egg size using digital photography: Testing Hoyt's method using Florida Scrub-Jay eggs. *Journal Field Ornithology*, 78(1): 109-116.
- Bruns, H. A., & Croy, L. I. (1985). Root volume and root dry weight measuring system for wheat cultivars. *Cereal Research Communications*, 13: 177-183.
- Burgos-Artizzu, X. P., Ribeiro, A., Guijarro, M., & Pajares, G. (2011). Real-time image processing for crop/weed discrimination in

- active contours. *Journal of Global Research in Computer Science*, 4(1): 34-37.
- Rashidi, M., Seyfi, K., & Gholami, M. (2008). Determination of egg volume using image processing. *Journal of Agricultural and Biological Science*, 2(6): 111-118.
- Schluter, S., Blaser, S. R. G. A., Weber, M., Schmidt, V., & Vetterlein, D. (2018). Quantification of root growth patterns from the soil perspective via root distance models. *Frontiers in Plant Science*, 9: 1084. Doi: 10.3389/fpls.2018.01084.
- Sofo, A., Elshafie, H. S., & Camele, I. (2020). Structural and functional organization of the root system: A comparative study on five plant species. *Plants*, 9: 1338. Doi:10.3390/plants9101338.
- Yang, D., Bian, Z., Zhang, K., Xiong, J., & Lei, S. (2017). Modeling root growth, crop growth and N uptake of winter wheat based on SWMS-2D: Model and validation. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 41: e0150064. <https://doi.org/10.1590/18069657rbc20150064>.
- Zanaty, E. A., & Ghiduk, A. S. (2013). A novel approach based on genetic algorithms and region growing for magnetic resonance image (MRI) segmentation. *Computer Science and Information Systems*, 10(3): 1318-1342.

