



بهینه‌سازی پرتوهای بذر ماش با امواج آلتراسونیک برای افزایش مؤلفه‌های بنیه گیاهچه توسط الگوریتم ژنتیک

شمس‌الدین اسکندر نژاد^۱، منوچهر قلی‌پور^{۲*} و حسن مکاریان^۲

^۱دانشجوی دکتری، گروه زراعت، دانشگاه صنعتی شاهرود

^۲دانشیار، گروه زراعت، دانشگاه صنعتی شاهرود

تاریخ دریافت: ۹۵/۹/۱ تاریخ پذیرش: ۹۷/۴/۱۳

چکیده

سابقه و هدف: جوانه‌زنی کامل (C)، سریع (R)، یکنواخت (U)، گیاهچه‌های قوی (V)، ویژگی‌هایی می‌باشند که همه باهم (CRUV) باعث کوتاه شدن زمان تا بسته شدن کانوبی و در نتیجه افزایش عملکرد گیاه می‌شوند. اگر احتمالاً بین کلیه یا برخی از اجزای CRUV همبستگی مثبت قوی (همبستگی بزرگتر از ۰/۹۵+) وجود نداشته باشد، یک سطح تیمار ممکن است بالاترین افزایش را در یک یا تعدادی از اجزای CRUV به دنبال داشته باشد. ولی برای اجزای دیگر، با تأثیر کم یا حتی کاهشنده به شمار آید. در این شرایط، انتخاب بهترین سطح تیمار دشوار است (مخمصه قضاوت؛ Judgment predicament). درون‌یابی سطوح تیمار برای حصول حداکثر افزایش ممکن در کلیه اجزای CRUV به طور همزمان (بهینه‌سازی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک) می‌تواند به عنوان تجزیه تکمیلی، راهی برای فایق آمدن بر مخمصه قضاوت به شمار رود. هدف از این آزمایش، ابتدا یافتن پاسخ این سؤال بود که آیا در ماش و گیاهان دیگر این مخمصه قضاوت وجود دارد یا خیر؟. ثانیاً، در صورت مثبت بودن پاسخ این سؤال، بهترین ترکیب مؤلفه‌های پرتوهای بذر ماش با امواج آلتراسونیک (به عنوان تیمارهای افزایشنده CRUV) شامل مدت خیساندن بذر قبل از پرتوهای، دمای پرتوهای و مدت پرتوهای بدست آورده شود.

مواد و روش‌ها: ابتدا بر روی میانگین داده‌های CRUV ۱۰ مقاله منتشر شده، تجزیه همبستگی انجام شد. سپس یک آزمایش جوانه‌زنی بذر ماش به صورت فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی با ۳ تکرار اجرا گردید. فاکتورهای آزمایش شامل مدت خیساندن بذر (۲، ۴، ۶، ۸، ۱۰ و ۱۲ ساعت)، مدت پرتوهای (۰، ۳، ۶، ۹ و ۱۲ دقیقه) و دمای پرتوهای (۱۷، ۲۲، ۲۷ و ۳۲ درجه سانتی‌گراد) بود. به لحاظ عدم وجود همبستگی مثبت قوی بین کلیه اجزای CRUV در ماش، اقدام به بهینه‌سازی آنها با استفاده از الگوریتم ژنتیک شد. برای این امر، ابتدا تابع مطلوبیت محاسبه گردید و سپس مقادیر تابع مطلوبیت کل به دست آورده شد. برای پیش‌بینی متغیرهای پاسخ، توابع خطی و غیر خطی متفاوتی مورد آزمون قرار گرفت که از بین آنها، تابع غیر خطی چندگانه مناسب تشخیص داده شد. سپس با استفاده از الگوریتم ژنتیک و توسط نرم‌افزار متلب، مقادیری از فاکتورهای آزمایش که در آن، کمیت CRUV به‌طور همزمان حداکثر می‌گردد، بدست آورده شد.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که همانند گیاهان دیگر، در ماش نیز بین برخی یا کلیه اجزای CRUV همبستگی مثبت قوی وجود نداشت. در نتیجه، به‌طور مورد انتظار در ماش نیز وجود مخمصه قضاوت صادق بود. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که علاوه بر اثرات اصلی، برهمکنش سه گانه فاکتورها بر CRUV معنی‌دار بود. ترکیب بهینه شده فاکتورهای آزمایش برابر با دمای پرتوهای

*مسئول مکاتبه: manouchehr.gholipoor@gmail.com

۲۴/۸۹ درجه سانتی‌گراد، مدت پرتو دهی ۴/۱۲۵ دقیقه و خیساندن بذور به مدت ۶/۰۱۳ ساعت قبل از پرتو دهی شد. این مقادیر فاکتورها توانست بالاترین افزایش ممکن را در CRUV به‌طور همزمان به دنبال داشته باشد.

نتیجه‌گیری: بر اساس نتایج این بررسی، به نظر می‌رسد مخمصه قضاوت همه‌گیر بوده و برای کلیه گیاهان زراعی صدق نماید. در نتیجه همانطور که برای ماش روی داد، مقادیر ترکیبی هر یک از فاکتورهای آزمایش (یا سطحی از تیمار) که برای آن (ها) بالاترین مقدار هر یک از اجزای CRUV حاصل می‌گردد مشابه نخواهد بود. در این شرایط، بهینه‌سازی به عنوان تجزیه و تحلیل تکمیلی در کنار مقایسه میانگین‌ها، می‌تواند بهترین سطح تیمار (آزمایشات تک عاملی) یا ترکیب تیماری (آزمایشات چند عاملی) را مشخص نموده و به لحاظ حصول افزایش ممکن در CRUV به‌طور همزمان، باعث تسریع در بسته شدن کانوپی گردد.

واژه‌های کلیدی: امواج آلتراسونیک، بینه گیاه‌چه، دمای پرتو دهی، مدت خیساندن.

مقدمه

تا به حال تیمارهای بذری زیادی برای افزایش رشد گیاهچه و عملکرد گیاهان زراعی استفاده شده و بر اساس نتایج متا-آنالیز^۱ به‌دست آمده توسط سلطانی و سلطانی (۲۰۱۵)، این تیمارهای بذری مؤثر بوده‌اند. افزایش عملکرد گیاهان زراعی ناشی از تیمار بذری زمانی قابل توجه‌تر خواهد بود که تیمار بذری، بتواند زمان از کاشت تا بسته شدن کانوپی را تقلیل دهد (۲۳). چون کوتاه شدن این دوره می‌تواند فواید زیادی داشته باشد که عبارتند از: (الف) در شرایط فاریاب و در غیاب تنش‌های زیستی و غیر زیستی، بسته شدن سریع‌تر کانوپی و جذب بیشتر تشعشع خورشیدی، رشد بالاتر را به دنبال دارد. (ب) در شرایط دیم، بسته شدن سریع‌تر کانوپی منجر به سایه‌اندازی بیشتر گیاه بر خاک و کاهش اتلاف رطوبت از طریق تبخیر می‌گردد (۱۴). (ج) پوشش گیاهی بالاتر در اوایل فصل رشد باعث افزایش تثبیت CO₂ به ازای آب تعرق یافته می‌شود (۲۴). (د) بسته شدن سریع‌تر کانوپی موجب افزایش قدرت رقابت گیاه با علف هرز می‌گردد (۱۷).

جوانه‌زنی کامل (درصد جوانه زنی بالا؛ C)، سریع (سرعت بالای جوانه‌زنی؛ R) و یکنواخت (یکنواختی بالای جوانه‌زنی؛ U) همچنین گیاه‌چه‌های قوی (وزن

خشک بیشتر؛ V) به‌عنوان اجزای بینه بذر، ویژگی‌های می‌باشند که همه باهم (CRUV) باعث کوتاه شدن زمان تا بسته شدن کانوپی و در نتیجه افزایش عملکرد گیاه می‌شوند. اکنون این سؤال مطرح است که اگر یک سطح تیمار بذری برای یک جزء از اجزای CRUV بهترین سطح باشد، برای اجزای دیگر نیز بهترین سطح خواهد بود؟ به بیان دیگر، آیا کلیه اجزای CRUV پاسخی مشابه به تیمارها نشان می‌دهند؟ پاسخ این سؤال در صورتی مثبت می‌باشد که بین هر ۴ جزء CRUV، همبستگی مثبت قوی ($r > +0.95$) وجود داشته باشد. برای یافتن پاسخ این سؤال، بر روی میانگین داده‌های CRUV ۱۰ مقاله منتشر شده در خصوص تیمارها و گیاهان مختلف، تجزیه همبستگی انجام شد.

نتایج تجزیه همبستگی اشاره شده در بالا نشان می‌دهد که در ۱۶ درصد از موارد، تنها برخی از اجزای CRUV دارای همبستگی مثبت قوی هستند (جدول ۱). در مابقی موارد، همبستگی منفی قوی (بهترین سطح تیمار برای برخی از اجزای CRUV به‌عنوان بدترین سطح تیمار برای اجزای دیگر به‌شمار می‌رود)، همبستگی مثبت ضعیف ($r < +0.95$)؛ یک سطح تیمار برای برخی از اجزای CRUV به‌عنوان بهترین سطح شناخته می‌شود ولی برای

بود. مطابق با گزارشات قبلی (۱۸)، شاهد از سطوح تیماری خیساندن بذر حذف گردید، چون در صورت عدم خیساندن بذر، فرآیندهای فیزیولوژیکی جوانه‌زنی شروع نشده و پرتو دهی بذر تأثیر کمی خواهد داشت. پس از اعمال تیمار خیساندن بذر در آزمایشگاه تکنولوژی بذر دانشگاه صنعتی شاهرود، بذور در دستگاه حمام آلترا سونیک دیجیتال (Digitaltrasonic مدل CD- 4820) با فرکانس ۴۲ کیلوهرتز پرتو دهی شدند. سپس ۲۵ عدد بذر برای هر ظرف پتری انتخاب گردید و بعد از ضد عفونی کردن آنها، به ظروف پتری یکبار مصرف استریل شده‌ای که در کف آنها یک عدد کاغذ صافی واتمن بود، منتقل شد. شمارش گیاهچه‌های ظاهر شده هر ۱۲ ساعت انجام شد. صفات مورد سنجش عبارت بودند از درصد جوانه‌زنی (C)، سرعت جوانه‌زنی {R؛ معکوس زمان (مجموع ساعت‌ها) تا ۵۰ درصد جوانه‌زنی}، یکنواختی جوانه‌زنی (U)؛ زمان بین ۱۰ و ۹۰ درصد جوانه‌زنی) و وزن خشک گیاهچه (V). صفات CRUV با استفاده از نرم‌افزار GERMIN7 (۲۳) محاسبه گردیدند.

همبستگی بین اجزای CRUV در ماش، غیر معنی‌دار یا ضعیف (کمتر از ۰/۹۵+) بود (جدول ۲). در نتیجه، کمیت تابع مطلوبیت کل از ۱ به ۰/۸۱ تقلیل یافت (شکل ۱). بنابراین سطوح فاکتورها (ترکیب تیماری) برای افزایش همزمان حداکثر مقدار اجزای CRUV یکسان نبود (جدول ۳). به عنوان نمونه، بهترین ترکیب تیماری برای حصول بالاترین سرعت جوانه‌زنی (۰/۱۳) بذر در روز) شامل ۸ ساعت خیساندن بذر، دمای پرتو دهی ۲۷ درجه سانتی‌گراد و مدت پرتو دهی ۳ دقیقه می‌باشد (جدول ۳).

اجزای دیگر، سطحی متوسط به شمار می‌رود، و حتی عدم وجود رابطه معنی‌دار به چشم می‌خورد. در این شرایط، انتخاب سطحی از تیمار که بتواند حصول بالاترین افزایش همزمان در کلیه اجزای CRUV را محقق کند، امری مشکل و غیر دقیق بوده و به عنوان "مخمصه قضاوت" شناخته می‌شود. درون‌یابی سطوح تیمار (بهینه‌سازی CRUV با استفاده از الگوریتم ژنتیک)، می‌تواند به عنوان تجزیه تکمیلی، راهی برای فایق آمدن بر "مخمصه قضاوت" به شمار آید.

هدف از این آزمایش، ابتدا یافتن پاسخ این سؤال بود که آیا همانند گیاهان ذکر شده در جدول ۱، برای ماش نیز مخمصه قضاوت وجود دارد؟. ثانیاً در صورت مثبت بودن پاسخ، از طریق بهینه‌سازی مبتنی بر ژنتیک الگوریتم، بهترین ترکیب تیماری مدت پرتو دهی، مدت زمان خیساندن بذر قبل از پرتو دهی و دمای پرتو دهی (به عنوان فاکتورهای افزایشنده CRUV {۲۵، ۲۶}) برای حصول حداکثر افزایش ممکن در مقادیر CRUV ماش به طور همزمان بدست آورده شود.

مواد و روش‌ها

آزمایش جوانه‌زنی: آزمایش جوانه‌زنی بذر ماش (*Vigna radiata L.*) به صورت کاملاً تصادفی در سه تکرار در آزمایشگاه تکنولوژی بذر دانشگاه صنعتی شاهرود اجرا گردید. تیمارهای آزمایش شامل ترکیب فاکتوریلی ۶ مدت خیساندن بذر (۲، ۴، ۶، ۸، ۱۰ و ۱۲ ساعت) قبل از پرتو دهی، ۵ مدت پرتو دهی (۰ (عدم پرتو دهی؛ شاهد)، ۳، ۶، ۹ و ۱۲ دقیقه) و ۴ دمای پرتو دهی (۱۷، ۲۲، ۲۷ و ۳۲ درجه سانتی‌گراد)

جدول ۱ - ضرایب همبستگی میانگین‌های گزارش شده مربوط به صفات تمامیت جوانه‌زنی (C): درصد جوانه‌زنی (R): یکنواختی جوانه‌زنی (U) و دنبه گیاهچه (V): وزن خشک گیاهچه).

Table 1. The result of correlation analysis on published mean values of germination completeness (C; germination percent), germination rapidity (R; germination rate), germination uniformity (U), and seedling vigor (V; seedling dry weight).

C-R	C-U	C-V	R-U	R-V	U-V	#N	Treatment- Plant/crop	تیمار - گیاه/گیاه زراعی	Reference
0.65*	-0.35	0.79**	0.53	0.75**	-0.76**	13	Environment& variety - <i>Glycine max</i> L.		(12)
0.72	0.99**	0.65	-0.25	0.63	-0.85*	6	Salinity& temperature- <i>Indigofera tinctoria</i> L.		(2)
0.93**	0.96**	0.10	0.96**	-0.09	-0.12	10	Salinity& variety- <i>Sesamum indicum</i> L.		(5)
0.97**	0.95**	0.96**	0.89**	0.90**	0.94**	8	Seed size& salinity- <i>Triticum aestivum</i> L.		(7)
0.79*	0.62	0.06	0.20	0.03	0.48	8	Allelopathy - <i>Indigofera tinctoria</i> L		(1)
0.96**	-0.89**	0.81**	-0.93**	0.88**	-0.91**	21	Seed aging - <i>Helianthus annuus</i> L.		(6)
0.85**	0.51	0.94**	0.31	0.86**	0.42	20	Drought - <i>Triticum aestivum</i> L.		(11)
0.97**	-0.83**	0.95**	-0.88**	0.99**	-0.88**	9	Drought - <i>Carthamus tinctorius</i> L.		(19)
0.91**	-0.87**	0.85**	-0.97**	0.91**	-0.86**	10	Drought& salinity - <i>Helianthus annuus</i> L.		(16)
--	--	--	0.22	0.40	-0.31	16	Temperature - <i>Atriplex dimorphostegia</i> L., <i>Salola crassa</i> L., <i>Suaeda aegyptiaca</i> L.		(8)
0.21	0.13	-0.18	0.08	0.42**	-0.61**	360	Ultrasound, temperature, pre-soaking- <i>Vigna radiata</i>	آزمایش فعلی Current emperiment	

*: P < 0.05, **: P < 0.01. #N: Number of mean or observed values (last row) used for correlation analysis.
#: تعداد میانگین یا مشاهدات (برای ردیف آخر) استفاده شده برای انجام تجزیه همبستگی.

مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این بررسی اولیه نشان داد که تابع زیر مناسب‌تر می‌باشد:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_{11} X_1^2 + \beta_{22} X_2^2 + \beta_{33} X_3^2 + \beta_{12} X_1 X_2 + \beta_{13} X_1 X_3 + \beta_{23} X_2 X_3 \quad (3)$$

که Y شامل متغیر پاسخ و تابع مطلوبیت کل است. X_1 ، X_2 و X_3 به ترتیب مدت خیساندن بذر، دمای پرتو دهی و مدت پرتو دهی می‌باشند. β_{ij} و β_i پارامترهای تابع هستند که باید مقدار آنها برآورد گردد. از روش حذف بک‌وارد برای خارج کردن اجزای غیر معنی‌دار از مدل استفاده شد (۲۱). در این بررسی، از روش مبتنی بر الگوریتم ژنتیک برای یافتن مقادیر مطلوب فاکتورهای آزمایش استفاده شد. برای محاسبات، نرم‌افزار متلب (نسخه ۲۰۰۹) مورد استفاده قرار گرفت.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثرات اصلی مدت پرتو دهی، مدت خیساندن بذر و دمای پرتو دهی بر هر یک از اجزای CRUV معنی‌دار بود (جدول ۲). علاوه بر این، برهمکنش سه گانه آنها نیز معنی‌دار بدست آمد.

جدول ۲- میانگین مربعات برای تمامیت جوانه‌زنی (C)، سرعت جوانه‌زنی (R)، یکنواختی جوانه‌زنی (U)، و قوی بودن گیاهچه (V).
Table 2. Mean squares for germination completeness (C), germination (R), germination uniformity (U), and seedling vigorousness (V).

S.O.V منابع تغییر	df درجه آزادی	#C	#R	#U	#V
خیساندن Presoaking (P)	5	203.29	5.51E-05	1355.77	0.41
دمای پرتو دهی Temperature(T)	3	320.40	1.24E-05	266.76	0.27
پرتو دهی Ultrasound(U)	4	139.74	8.57E-06	93.29	0.76
P×T	15	129.48	7.35E-06	228.27	0.54
P×U	20	82.61	9.28E-06	663.89	0.36
P×T×U	72	74.98	9.73E-06	309.59	0.45
خطا Error	240	15.07	3.7E-07	18.54	5.9E-4

#: اثرات ساده و متقابل فاکتورها بر صفات CRUV در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار است به همین خاطر علامت ستاره استفاده نشده است.

#: The simple and interactive effects of factors are significant on CRUV traits at 1% probability level. This is why the asterisk sign was not used.

بهینه‌سازی اجزای CRUV: سه فاکتور آزمایش شامل مدت خیساندن بذر، دمای پرتو دهی و مدت پرتو دهی به‌عنوان متغیر مستقل و اجزای CRUV به‌عنوان متغیر وابسته (پاسخ) در نظر گرفته شدند. برای محاسبه تابع مطلوبیت (d_i)، از روش درینگر و سوئیچ (۱۹۸۰) استفاده گردید (۴):

$$d_i = \left(\frac{\hat{Y} - A}{B - A} \right)^{w_i}, \quad A \leq \hat{Y} \leq B$$

$$d_i = 1, \quad \hat{Y} > B \quad (1)$$

$$d_i = 0, \quad \hat{Y} < B$$

که در آن A و B به ترتیب حداقل و حداکثر مقدار بدست آمده برای مشاهده w_i وزن، و \hat{Y} متغیر پاسخ برآورد شده می‌باشند. برای محاسبه تابع مطلوبیت کل (D)، از رابطه زیر استفاده شد (۹):

$$D = (d_1^{p1} \times d_2^{p2} \times d_3^{p3} \times \dots \times d_n^{pn})^{1/n} \quad (2)$$

که $d_1 \dots d_n$ متغیرهای پاسخ، $p1 \dots pn$ توان (اهمیت نسبی) متغیرهای پاسخ بوده و می‌توانند مقادیر از ۱ تا ۵ را به خود اختصاص دهند. در بررسی اولیه، مدل‌های خطی و غیر خطی مختلف

دصد مقدار حداقل آن بالغ گردید. (ج) مهم‌تر از همه، اثر متقابل ۳ گانه معنی‌دار بود.

یکی از راه حل‌های فایق آمدن بر "مخمصه قضاوت" اشاره شده در بالا، بهینه‌سازی چند متغیره می‌باشد (۲۸) که بر اساس آن، کلیه اجزای CRUV به طور همزمان بهینه‌سازی می‌گردند. در این بررسی از روش تابع مطلوبیت برای بهینه‌سازی استفاده شد. این روش نسبت به روش‌های دیگر از جمله روش تابع فاصله و تابع اتلاف^۲ (۲۶) از ارجحیت بالاتری برخوردار می‌باشد. علت این امر، جامعیت و انعطاف پذیری تابع در اهمیت وزن دهی به متغیرها است (به معادله ۲ مراجعه شود). با توجه به حصول ضرایب تبیین بالا (R^2 و Adjusted R^2) (جدول ۴)، روش مذکور توانست واکنش CRUV را به مدت خیساندن بذر، دمای پرتودهی و مدت پرتودهی به خوبی پیش‌بینی نماید، به ویژه اینکه با استفاده از روش حذف بک وارد (Backward)، پارامترهای غیر معنی‌دار از تابع حذف گردیدند و اساس بهینه‌سازی بر ژنتیک الگوریتم پایه‌گذاری شد. یکی از نقاط قوت این الگوریتم، فایق آمدن بر نقاط مطلوب موضعی تابع و یافتن دقیق نقطه مطلوب سرتاسری می‌باشد (۱۳).

ترکیب تیماری درون‌یابی شده توسط الگوریتم ژنتیک برای حصول حداکثر ممکن مقادیر اجزای CRUV به طور همزمان برابر بود با ۶/۰۱۳ دقیقه خیساندن بذر قبل از پرتودهی، انجام پرتودهی به مدت ۴/۱۲۵ دقیقه و تنظیم دمای دستگاه پرتودهی روی دمای ۲۴/۸۹ درجه سانتی‌گراد. این مقادیر درون‌یابی شده، همه در دامنه سطوح فاکتورهای مورد آزمایش بود و در شرایطی به وجود آمد که اهمیت هر یک از اجزای CRUV در زمان تا بسته شدن کانوپی مشابه فرض شد. در معادله ۲ این امکان وجود دارد که برای هر یک از اجزاء، اهمیتی متفاوت لحاظ گردد.

این در حالی است مطلوب‌ترین ترکیب تیماری برای بدست آوردن بیشترین یکنواختی جوانه‌زنی (۱۰۴/۱۱) شامل ۲ ساعت خیساندن بذر، دمای پرتودهی ۲۲ درجه سانتی‌گراد و مدت پرتودهی ۶ دقیقه است. حال محقق (یا کشاورز) در انتخاب بهترین ترکیب تیماری برای حصول حداکثر مقدار RU (و همچنین CV) به‌طور همزمان دچار سردرگمی شده و اصطلاحاً با "مخمصه قضاوت" مواجه می‌گردد. به لحاظ اینکه در گیاهان دیگر نیز همبستگی مثبت قوی بین کلیه یا برخی از اجزای CRUV وجود ندارد (جدول ۱)، به نظر می‌رسد این "مخمصه قضاوت" برای گیاهان دیگر نیز عمومیت داشته باشد. به عنوان نمونه، در بررسی ملکی فراهانی و فهیمی نژاد (۲۰۱۱) بر روی زیره سبز (*Cuminum sp*) مشخص گردید که در شرایط پرتودهی بذر با امواج ۴۰ کیلوهرتز به مدت ۴ دقیقه، صفات درصد جوانه‌زنی، وزن خشک گیاهچه و سرعت جوانه‌زنی به ترتیب در گروه‌های آماری a، c و b قرار گرفتند (۱۵)؛ به بیان دیگر، ۴ دقیقه پرتودهی بذر زیره موجب بالاترین افزایش در درصد جوانه‌زنی می‌شود نه وزن خشک گیاهچه و سرعت جوانه‌زنی؛ در مقابل، مدت‌های دیگر پرتودهی باعث بیشترین افزایش در سرعت جوانه‌زنی و وزن خشک گیاهچه می‌شوند و در درصد جوانه‌زنی، افزایش متوسط یا ضعیف را به دنبال دارند.

به لحاظ اینکه تابع ریاضی هر یک از اجزای CRUV دارای چندین نقطه مطلوب موضعی^۱ می‌شود، می‌توان گفت که این صفات (CRUV) دارای مخمصه ریاضی نیز می‌باشند. علت‌های این امر عبارت است از: (الف) تعداد ترکیبات تیماری خیلی زیاد می‌باشد ($4 \times 5 \times 6 = 120$). (ب) تنوع ایجاد شده در CRUV در اثر ترکیبات تیماری خیلی زیاد می‌باشد (جدول ۳)؛ به عنوان مثال دامنه تغییرات سرعت جوانه‌زنی، بر ۶۳

2- Loss function

1- Local optima

جدول ۳- برخی ویژگی‌های آماری تمامیت جوانه‌زنی (C): درصد جوانه‌زنی، سرعت جوانه‌زنی (R: day^{-1}), یکنواختی جوانه‌زنی (U) و قوی بودن گیاهچه (V: وزن خشک گیاهچه $\text{mg}\cdot\text{seedling}^{-1}$) و ترکیب تیماری (مدت خیساندن، دمای پرتودهی و مدت پرتودهی) که برای آنها بالاترین مقدار هر یک از اجزای CRUV حاصل می‌شود. برای CRUV (ردیف آخر)، ترکیب تیماری با استفاده از الگوریتم ژنتیک درون‌یابی شد.

Table 3. Some statistical properties of germination completeness (C; germination percent), germination rapidity [R; germination rate (day^{-1})], germination uniformity (U), and seedling vigorosity [V; seedling dry weight ($\text{mg}\cdot\text{seedling}^{-1}$)], and combination of 3 treatments (pre-soaking duration, irradiation temperature, and irradiation duration) for which the maximum value of each component of CRUV was produced. For trait CRUV (last row), the treatment combination was interpolated using genetic algorithm.

صفت Trait	حداقل Minimum		حداکثر Maximum		دامنه Range		میانگین Average		ترکیب تیماری برای حصول حداکثر مقدار اجزای CRUV Treatment combination for maximum value of CRUV components			
	مدت خیساندن (ساعت) Pre-soaking period (hour)	دما Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	مدت پرتودهی (دقیقه) Irradiation duration (minute)	مدت خیساندن (ساعت) Pre-soaking period (hour)	دما Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	مدت پرتودهی (دقیقه) Irradiation duration (minute)	مدت خیساندن (ساعت) Pre-soaking period (hour)	دما Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	مدت پرتودهی (دقیقه) Irradiation duration (minute)	مدت خیساندن (ساعت) Pre-soaking period (hour)	دما Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	مدت پرتودهی (دقیقه) Irradiation duration (minute)
C	95.06	100.00	4.94	97.77	4	17	6					
R	0.008	0.013	0.005	0.009	8	27	3					
U	74.01	104.11	30.1	92.51	2	22	6					
V	1.02	1.711	0.691	1.344	6	22	3					
CRUV					6.013	24.89	4.125					

جدول ۴- اجزای کاهش یافته مدل پاسخ، پارمترها و شاخص‌های آماری (R^2 و R^2 تعدیل شده) بعد از حذف به روش بک‌وارد. X_1 ، X_2 و X_3 به ترتیب مدت خیساندن، دمای پرتو دهی و مدت پرتو دهی می‌باشند. **Completeness**: تمامیت جوانه‌زنی (درصد جوانه‌زنی)؛ **Rapidity**: سرعت جوانه‌زنی؛ **Uniformity**: یکنواختی جوانه‌زنی؛ **Vigor**: قوی بودن گیاهچه.

Table 4. Reduced response model components, parameters and statistical indices (R^2 and adjusted R^2) after backward elimination. The X_1 , X_2 , and X_3 represent pre-soaking duration, irradiation temperature, and irradiation duration, respectively. Completeness: germination percent; rapidity: germination rate; uniformity: germination uniformity; vigor: vigorousness.

Model components	General desirability (D)	Response variable متغیر پاسخ			
		Completeness (C)	(R)	Uniformity (U)	Vigor (V)
Intercept	5.11254	45.84234	-0.00345	-2.853244	98.58938
X_1	0.15432	-5.74325	0.00048	0.00885	1.00772
$(X_1)^2$	-0.02432	0.523451	-0.00453	-0.00368	---
$(X_2)^2$	0.00324	-0.35678	0.00012	---	0.00298
X_{13}	-0.00091	0.008134	---	-0.01433	---
X_{23}	0.002201	---	---	---	---
X_2	0.30423	8.00116	0.05002	0.00895	0.99652
X_3	0.05245	0.09945	-0.00106	-0.01071	-0.33015
R^2	0.9660	0.9721	0.9844	0.9921	0.9701
Adjusted R^2	0.9300	0.9431	0.9691	0.9801	0.9421

نتیجه، بیشتر شدن انتقال توده‌ای مواد بین ارگانل‌ها در درون سلول و بیشتر شدن سرعت واکنش‌های بیوشیمیایی نیز از اثرات مثبت پرتو دهی به شمار می‌رود (۳). افزایش فعالیت آنزیم آلفا آمیلاز نیز به اثرات پرتو دهی نسبت داده شده است (۲۷).

نتیجه‌گیری کلی

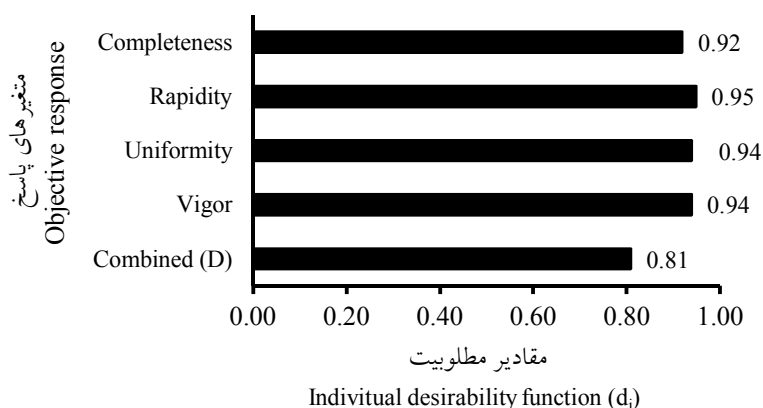
نتایج نشان داد که همانند گیاهان دیگر، در ماش همبستگی بین کلیه اجزای CRUV مثبت قوی (+۰/۹۵) نیست. در نتیجه به‌طور مورد انتظار، یک سطح تیمار نمی‌تواند برای همه اجزای CRUV بهترین سطح باشد. به‌عنوان نمونه، بهترین مدت خیساندن برای C، ۴ ساعت بود؛ این در حالی است که برای R، U، و V، مقدار آن به ترتیب ۸، ۲ و ۶ ساعت به دست آمد. به لحاظ اینکه این چهار جزء CRUV با همدیگر باعث تسریع قابل توجه در زمان تا بسته شدن کانوبی می‌گردند، باید سطحی از تیمار (ترکیب تیماری) انتخاب گردد که حداکثر افزایش ممکن در هر چهار جزء را به‌طور همزمان به دنبال داشته باشد. بهینه‌سازی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک رویه‌ای کارآمد در این خصوص می‌باشد که می‌تواند

به‌طورکلی نتایج این بررسی نشان داد که پرتو دهی بذر با امواج آلتراسونیک می‌تواند نسبت به شاهد باعث افزایش مؤلفه‌های بنیه گیاهچه گردد (نتایج ارایه نشده). این یافته با یافته‌های گزارش شده در خصوص گیاهان دیگر از جمله تربچه (۲۰)، جو (۲۵) و زیره سبز (۱۵) مطابقت دارد. مکانیسم تأثیر مثبت پرتو دهی بر بذر به تغییر در ساختار فیزیکی و عملکرد مولکول‌ها مرتبط است. اثر امواج آلتراسونیک به‌دلیل ایجاد پدیده حفرگی^۱ یا تشکیل حباب‌های بسیار ریزی است که تحت انقباض و انبساط به صورت لحظه‌ای و نقطه‌ای توسط حرارت و فشار فوق‌العاده زیاد در محیط مایع ایجاد می‌شود و این وضعیت باعث اثرات فیزیکی و شیمیایی بر مولکول‌های مجاور می‌گردد معمول‌ترین عوامل تحریک کننده شامل حرارت و تأثیرات مکانیکی بر روی غشای سلولی می‌باشد که این امواج، پوسته بذر را نفوذ پذیرتر کرده و به دنبال آن، جذب آب راحت‌تر صورت می‌گیرد. در اثر این عمل، جوانه‌زنی و خروج گیاهچه از پوسته تسهیل می‌شود (۱۹). علاوه بر این، افزایش جنبش^۲ محیط مایع و در

1- Cavitation
2 - Movement

آمده برای بذر ماش برابر با ۶/۱۳ دقیقه خیساندن بذر قبل از پرتودهی، ۴/۱۲۵ دقیقه پرتودهی و دمای پرتودهی ۲۴/۸۹ درجه سانتی‌گراد بود.

در تجزیه و تحلیل‌های مشابه این آزمایش و یا حتی در مراحل دیگر رشد و نمو (مانند عملکرد دانه و درصد روغن دانه) مورد استفاده واقع شود. در این بررسی، مقادیر مطلوب مؤلفه‌های پرتودهی بدست



شکل ۱- نمودار مقادیر مطلوبیت (d_i) متغیرهای پاسخ مختلف {Completeness: تمامیت جوانه‌زنی (درصد جوانه‌زنی): Rapidity: سرعت جوانه‌زنی؛ Uniformity: یکنواختی جوانه‌زنی؛ Vigor: قوی بودن گیاهچه} و ارتباط آنها مبتنی بر تابع مطلوبیت کل (D).
Figure 1. Bar graph of individual desirability values (d_i) of various objective responses [completeness (germination percent), rapidity (germination rate), uniformity (germination uniformity), and vigor (seedling dry weight)] and their association based on general desirability (D).

منابع

1. Ansori, A., Shahgholi, H., Asghari, H.R., and Azarni, M. 2012. Study of allelopathic effects of seven plants on germination and initial growth of *Indigofera tinctoria* L. Tech. Plant Prod., 11: 89-98 (In Persian).
2. Ansori, A., Shahgholi, H., Gholipoor, M., and Makarian, H. 2013. Effect of salinity and temperature on seed germination of *Indigofera tinctoria* L. Tech. Plant Prod., 13: 54-65 (In Persian).
3. Bar, R. 1988. Ultrasound-enhanced bioprocesses: cholesterol oxidation by *Rhodococcus erythropolis*. Biotech. Bioeng., 32: 655-663.
4. Derringer, G., and Suich, R. 1980. Simultaneous optimization of several response variables. J. Qual. Tech. 12: 214-219.
5. Fazeli, F., Nezami, A., Parsa, M., and Kafi, M. 2014. Evaluation of components of germination and seedling growth of *Sesamum indicum* L. ecotypes under salinity conditions. Environ. Stresses Plant Sci., 7: 217-232 (In Persian).
6. Ghorbani, R., Rahban, S., Mojtabaii, M., and Badri, A. 2015. Effect of seed aging on germination and seedling growth of sunflower (*Helianthus annuus* L.) cultivars. Iran. J. Seed Res., 1: 7-13 (In Persian).
7. Ghorbani, M.H., Soltani, A., and Amiri, S. 2008. The effect of salinity and seed size on response of wheat germination and seedling growth. J. Agri. Sci. Nat. Res., 14: 22-30 (In Persian).
8. Golestani-Far, F., and Mahmoodi, S. 2015. Cardinal temperatures for germination in wild orach (*Atriplex dimorphostegia* L.), saltwort (*Salola crassa* L.) and seepweed (*Suaeda aegyptiaca* L.) and effect of temperature on their germination characteristics. J. Seed Ecophysiol., 1: 71-87 (In Persian).
9. Harrington, E.J.R. 1965. The desirability function. Indust. Qual. Cont., 21: 494-498.

10. Hay, R.K.M., and Walker, A.J. 1989. Introduction to the Physiology of Plant Yield. Longman Group UK Limited, Harlowm Pp: 57-72.
11. Jafarnezhad, A., Taheri, G., and Rahchamanie, A.A. 2009. Study of drought tolerance in four wheat genotypes at germination stage. Environ. Stresses Agric. Sci. 2: 73-85 (In Persian).
12. Khaliliaqdam, N., Soltani, A., Latifi, N., and Ghaderi-Far, F. 2003. Effect of environmental conditions on soybean seed vigor. Elect. J. Plant Prod., 5: 87-104 (In Persian).
13. Koza, J., Keane, M., Streeter, M., Mydlowec, W., Yu, J., and Lanza, G. 2003. Genetic Programming IV: Routine Human-Competitive machine intelligence. Kluwer Academic Publishers.
14. Lopez-Castaneda, C., Richards, R.A., and Farquahar, G.D. 1995. Variation in early vigor between barley and wheat. Plant Sci., 35: 472-479.
15. Maleki-Farahani, S., and Fahiminejad, H. 2011. The effect of seed germination in common caraway (*Carum* sp.) and cumin (*Cuminum* sp.) treated with ultrasonics. Paper Abstracts of the 2nd Conference on Seeds. Mashhad: Ferdowsi University, pp. 258-262.
16. Moghanibashi, M., Karimmojeni, H., and Nikneshan, P. 2013. Seed treatment to overcome drought and salt stress during germination of sunflower (*Helianthus annuus* L.). J. Agrobiol., 2: 89-96 (In Persian).
17. Rebetzke, G.J., and Richards, R.A. 1999. Genetic improvement of early vigour in wheat. Aust. J. Agric. Res., 50: 291-301.
18. Saleminasab, M., Gholipoor, M., Makarian, H., and Ariani, 2015. Interaction of ultrasound and drought stress on growth and development of corn. Proceedings of the first conference on novel findings in bioscience & agriculture, Zabol University, Iram (In Persian).
19. Sharifi, R., and Sharifi, R. 2008. Study the effect of PEG on germination and seedling growth of safflower cultivars. J. Iran. Biol., 21: 14-21 (In Persian).
20. Shimomura, S. 1990. The effects of ultrasonic irradiation on sprouting radish seed, Ultrasonic Symposium, Proceedings, IEEE, 3: 1665-1667.
21. Sivakumar, T., Manavalan, R., and Valliappan, K. 2007. Global optimization using derringer's desirability function: Enantioselective determination of ketoprofen in formulations and in biological matrices. Acta Chrom., 19: 29-47.
22. Soltani, E., Soltani, A., and Oveisi, M. 2013. Modeling the seed aging effects on emergence of drought-stressed wheat: Optimization of GERMIN software for prediction of emergence pattern. J. Agron., 15: 147-160 (In Persian).
23. Soltani, E., and Soltani, A. 2015. Meta-analysis of seed priming effects on seed germination, seedling emergence and plant yield: Iranian studies. Int. J. Plant Prod., 9: 413-432.
24. Tanner, C.B., and Sinclair, T.R. 1983. Efficient water use in plant production: research or re-search? P 1-28, In: H.M. Taylor, W.R. Jordan and T.R. Sinclair (eds), Limitations to Efficient Water use in Plant Production, American Society of Agronomy. Madison, WI.
25. Vinning, G.G. 1998. A compromise approach to multi-response optimization. J. Quality Tech., 30: 309-313.
26. Yaldagard, M., Mortazavi, S.A., and Tabatabaie, F. 2008a. Influence of ultrasonic on the germination of barley seed and its alpha-amylase. Afr. J. Biotech., 7: 2456-2471.
27. Yaldagard, M., Mortazavi, S.A., and Tabatabaie, F. 2008b. The effect of ultrasound in combination with thermal treatment on the germinated barley's alpha-amylase activity. Korean J. Chemical Eng., 25: 517-523.
28. Zadbood, A., Noghondarian, K., and Zadbood, Z. 2013. Multiresponse surface optimization via harmony search algorithm. Int. J. Indus. Eng. Prod. Res., 24: 131-136.