



اثر تنظیم کننده رشد گیاهی، رقم و ریزنمونه در اندام‌زایی درون شیشه‌ای سویا (*Glycine max* L.)

Effects of Plant Growth Regulators, Genotype and Explant on *in vitro* Organogenesis of Soybean (*Glycine max* L.)

وحید مهری زاده^۱ و ابراهیم دورانی^{۲*}

Vahid Mehrizadeh¹, Ebrahim Dorani^{2*}

۱- دکترای بیوتکنولوژی گیاهی، گروه به نژادی و بیوتکنولوژی گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، ایران.

۲- استاد گروه به نژادی و بیوتکنولوژی گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، ایران

1- Ph.D. Student of Agricultural Biotechnology, 2- Professor, Department of Plant Breeding and Biotechnology, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Iran

*Corresponding Author, Email: [پست الکترونیکی: Dorani@tabrizu.ac.ir](mailto:Dorani@tabrizu.ac.ir)

Dorani@tabrizu.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۹ - تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۶/۱۲ - تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۶/۲۳)

Received: 2025/02/27 | Accepted: 2025/09/03 | Published: 2025/09/14

Abstract

Soybean is one of the most important crops and nutrient source of oil and protein in the world. Soybean breeding through biotechnology is one of the current manners to overcome cultivation and qualitative problems of soybean production. In this study effect of genotype (Williams, Sari and DPX), explant (hypocotyl, cotyledon and first leaf) and plant growth regulators such as BAP (0.5, 1.0, 1.5 and 2.0 mg/L) and IBA (0.0, 0.1 and 0.5 mg/L) on *in vitro* organogenesis of soybean investigated. This experiment was performed as a factorial in a completely randomized design (CRD) with four replications. Analysis of variance for organogenesis parameters showed that there was significant difference between genotypes, explants and PGR combinations at one percent significance level. Highest organogenesis obtained from cotyledon explants in MS medium supplemented with 1.5 and 2.0 mg/L BAP plus 0.1 mg/L IBA in Williams. The highest shoot per explant have been recorded in medium supplemented with 1.5 mg/L BAP plus 0.1 mg/L IBA in Williams using cotyledon explants. Finally, the regenerated shoots transferred to 1/2 MS medium supplemented with 1.0 mg/L IBA for root induction and rooted plants adapted in greenhouse. The optimal results obtained in this study can provide the basis for future research, especially gene transfer studies to these soybean genotypes.

Keywords: Genotype, Organogenesis, Plant Growth Regulators, Soybean.

چکیده

رفرنس دهی این مقاله Citation

Mehrizadeh V, Dorani E. (2025). Effects of plant growth regulators, genotype and explant on *in vitro* organogenesis of soybean (*Glycine max* L.). Genetic Engineering and Biosafety Journal, 13 (2): 235-245. Doi: [10.61882/gebsj.13.2.8](https://doi.org/10.61882/gebsj.13.2.8)
URL: <http://gebsj.ir/article-1-511-en.html>

Genetic Engineering and Biosafety Journal
Volume 13, Number 2, 2025

خلاصه

سویا (*Glycine max* L.) یکی از مهم ترین محصولات کشاورزی و منبعی غنی از روغن و پروتئین محسوب می شود. امروزه اصلاح سویا از طریق بیوتکنولوژی گیاهی یکی از روش های کارآمد در غلبه بر مشکلات زراعی و کیفی این گیاه می باشد. دستیابی به یک سیستم باززایی کارآمد و تکرارپذیر، پیش نیاز برنامه های بهبود ژنتیکی گیاهان است. در پژوهش حاضر، اثر رقم (ویلیامز، ساری و DPX)، ریزنمونه (هیپوکوتیل، کوتیلدون و برگچه اولیه) و تنظیم کننده های رشد گیاهی BAP (۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ میلی گرم در لیتر) و IBA (۰، ۰/۱ و ۰/۵ میلی گرم در لیتر) در اندام زایی سویا مورد مطالعه قرار گرفتند. این آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با چهار تکرار اجرا شد. نتایج تجزیه واریانس داده ها نشان داد که برای صفات اندام زایی بین ارقام، ریزنمونه ها و سطوح مختلف ترکیبات هورمونی اختلاف معنی داری در سطح احتمال یک درصد وجود داشت. بیشترین درصد اندام زایی از ریزنمونه کوتیلدون رقم ویلیامز کشت شده در محیط های MS حاوی ۱/۵ و ۲ میلی گرم در لیتر BAP به همراه ۰/۱ میلی گرم در لیتر IBA حاصل شد. همچنین بیشترین تعداد شاخساره تشکیل شده به ازای هر ریزنمونه، از ریزنمونه کوتیلدون رقم ویلیامز در محیط حاوی ۱/۵ میلی گرم در لیتر BAP به همراه ۰/۱ میلی گرم در لیتر IBA مشاهده شد. در نهایت شاخه های باززا شده جهت القاء و تشکیل ریشه به محیط MS ۱/۲ حاوی یک میلی گرم در لیتر هورمون IBA منتقل و سپس گیاهچه های رشد یافته به محیط آزاد سازگار و در گلدان ها کشت شدند. نتایج بهینه بدست آمده در این مطالعه می تواند زمینه را برای تحقیقات آینده و بخصوص مطالعات انتقال ژن به این ارقام سویا فراهم سازد.

کلمات کلیدی: اندام زایی، تنظیم کننده های رشد گیاهی، رقم، سویا.

مقدمه

Introduction

سویا (*Glycine max* L.) یکی از مهم ترین محصولات کشاورزی دنیا است که نه تنها به دلیل ظرفیتش در تولید روغن بلکه به دلیل نقش آن در تغذیه انسان و دام از جایگاه ویژه ای برخوردار است. سویا از نظر ذخایر روغنی و پروتئینی حائز اهمیت فراوان می باشد. از میان گیاهان روغنی، سویا ویژگی های منحصر به فردی دارد و کاربرد این گیاه دارای طیف بسیار گسترده ای است (Babaei et al., 2021; Schaole and Mangena, 2024).

افزایش جمعیت جهان و افزایش تقاضا برای محصولات پروتئینی، باعث شده گیاه سویا در همه نواحی آب و هوایی جهان به عنوان یکی از با ارزش ترین محصولات کشاورزی و منبعی غنی جهت تولید روغن و پروتئین کشت شود. اما حساسیت بالا به تنش های محیطی به ویژه شوری و خشکی، آفات و بیماری ها و پایین بودن شاخص برداشت از محدودیت های اصلی بهره وری سویا محسوب می شوند (Wang et al., 2022). افزایش میزان روغن، بهبود کیفیت تغذیه ای آن، مقاومت به آفات و بیماری ها از اهداف اصلی برنامه های اصلاحی سویا می باشند. در گذشته تلاش های زیادی در جهت افزایش مقاومت آن در برابر تنش های زیستی و غیرزیستی با استفاده از روش های اصلاح نباتات کلاسیک صورت گرفته است. اما خودبارور بودن این گیاه و تنوع ژنتیکی کم واریته های آن، اصلاح سویا با روش های کلاسیک را با محدودیت روبرو کرده است (Vargas-Almendra et al., 2024).

استفاده از بیوتکنولوژی گیاهی در کنار روش های کلاسیک، امید دانشمندان برای غلبه بر مشکلات زراعی و کیفی گیاهان را افزایش داده است. امروزه فناوری کشت بافت مبتنی بر توانایی باززایی به طور گسترده در زمینه های مختلف از جمله تحقیقات پایه، ریزازدیادی و اصلاح ژنتیکی استفاده می شود. اصلاح سویا با استفاده از روش های کشت درون شیشه ای و انتقال ژن، به عنوان یکی از روش های کارآمد در کنار روش های

کلاسیک، می‌تواند پتانسیل خوبی را در زمینه اصلاح نباتات و غلبه بر مشکلات این گیاه فراهم کند (Raza et al., 2019; Begum et al., 2019).

استفاده از مزایای کشت بافت درون‌شیشه‌ای از جمله تغییر ژنتیکی گیاهان در بسیاری از گونه‌ها به خاطر مشکلات باززایی گیاهان با محدودیت مواجه شده است. امروزه دستیابی به یک روش کشت بافت تکرارپذیر، مهمترین عامل موفقیت در دستورزی ژنتیکی گیاهان به حساب می‌آید (Long et al., 2022). انتخاب ژنوتیپ‌های پاسخ دهنده به کشت بافت اولین قدم در یک برنامه مهندسی ژنتیک یک گیاه می‌باشد. کارایی موفقیت در این رابطه به عوامل متعددی از جمله گونه و ژنوتیپ گیاهی، نوع ریزنمونه، نوع و غلظت تنظیم کننده‌های رشد گیاهی و غیره بستگی دارد (Mehrizadeh et al., 2021; Tiwari et al., 2023).

گزارش‌های متعدد بر این نکته تاکید دارند از میان عوامل مختلف مؤثر بر باززایی، اثر ژنوتیپ به عنوان یک عامل محدودکننده اصلی در کشت بافت سویا مطرح است. چون علی‌رغم دولپه‌ای بودن همچنان با محدودیت درصد باززایی پایین نسبت به سایر دو لپه‌ای‌ها مواجه است. باززایی در سویا به شدت وابسته به ژنوتیپ است. حتی نوع، کیفیت و منبع ریزنمونه نیز در باززایی سویا مؤثر می‌باشند (Zhong et al., 2024; Walne et al., 2020). هرچند هر سلول زنده پتانسیل تبدیل شدن به یک گیاه کامل را دارد، ولی در اکثر مطالعات از سلول‌ها یا بافت‌هایی با رشد فعال و متابولیسم فیزیولوژیکی بالا به عنوان ریزنمونه استفاده می‌کنند (Long et al., 2022). برای شاخه‌زایی در سویا از ریزنمونه‌های مختلف از جمله هیپوکوتیل (Raza et al., 2017)، مریستم ساقه (Liu et al., 2004)، جنین (Rao and Hildebrand, 2009)، کوتیلدون (Zhong et al., 2024) و نیمه بذر (Sojkova et al., 2016) استفاده شده است.

تنظیم کننده‌های رشد گیاهی از دیگر عوامل مؤثر در کشت بافت گیاهان می‌باشند. سیتوکینین‌ها و اکسین‌ها از مهمترین تنظیم کننده‌های رشد گیاهی هستند که در رشد، تمایز و تقسیم سلولی نقش دارند (Mangena, 2021). معمولاً تغییر نسبت سیتوکینین به اکسین بیرونی می‌تواند به نفع یک الگوی رشد مثل ریشه‌زایی، کالوس‌زایی و یا شاخه‌زایی باشد (Lee et al., 2020; Muzika et al., 2024). مطالعات نشان داده BAP به عنوان یکی از سیتوکینین‌های شناخته شده به تنهایی و یا در ترکیب با سایر تنظیم کننده‌های رشدی، در القای شاخه‌زایی و شروع جنین‌زایی سوماتیکی در برخی از گیاهان از جمله حبوبات تأثیرگذار بوده است (Schaole and Mangena, 2024). به منظور باززایی شاخه در برخی از ارقام سویا از تنظیم کننده‌های رشدی مختلفی از جمله BAP، کیتین و تیدیاژول به تنهایی یا در ترکیب با یک اکسین استفاده شده است (Tiwari et al., 2022). گزارش شده تأثیر ترکیب تیدیاژول و BAP در شاخه‌زایی سویا مؤثرتر از اثر جداگانه آنها می‌باشد. در حالی‌که برتری BAP نسبت به کیتین و تیدیاژول در باززایی برخی از ارقام سویا نیز گزارش شده است (Arun et al., 2016).

این پژوهش با هدف ارزیابی توانایی اندام‌زایی برخی از ارقام تجاری سویا انجام شد. بدین منظور برخی از عوامل مؤثر در اندام‌زایی سویا از قبیل رقم، ریزنمونه و تنظیم کننده‌های رشد گیاهی مورد مطالعه قرار گرفتند.

Materials and Methods

مواد و روش‌ها

مواد گیاهی: در مطالعه حاضر بذور سه رقم رایج سویا در کشور (ویلیامز، ساری و DPX) از موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر دریافت شد.

آماده‌سازی مواد گیاهی: جهت ضد عفونی سطحی، ابتدا بذور به مدت یک دقیقه در اتانول ۷۰٪ قرار گرفت و بعد از یک بار شستشو با آب مقطر استریل، با هیپوکلریت سدیم دو و نیم درصد به مدت ۱۵ دقیقه تیمار شدند. سپس بذور سه مرتبه با آب مقطر استریل شستشو داده شدند. بذور ضد عفونی شده در شرایط استریل در محیط کشت جوانه‌زنی شامل محیط کشت پایه MS (Murashige and Skoog, 1962)

تکمیل شده با ۳٪ ساکارز و ۰/۸٪ آگار منتقل و در اتاق رشد با دوره نوری ۱۶ ساعت روشنایی و ۸ ساعت تاریکی در دمای ۲۵ درجه سانتی-گراد نگهداری شدند. پس از جوانه زنی بذور، ریزنمونه های هیپوکوتیل و کوتیلدون از گیاهچه های ۸ روزه و ریزنمونه برگچه اولیه از گیاهچه های ۱۰ روزه تهیه شدند. ریزنمونه ها در محیط کشت MS حاوی ترکیبی از غلظت های مختلف BAP (۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ میلی گرم در لیتر) و IBA (۰، ۰/۱ و ۰/۵ میلی گرم در لیتر) به همراه محیط فاقد تنظیم کننده رشدی، تکمیل شده با ۳ درصد ساکارز و ۰/۸٪ آگار کشت و در اتاقک رشد در دمای ۲۵ درجه سانتی-گراد و دوره نوری (۱۶/۸) با شدت نور ۵۰۰۰ لوکس نگهداری شدند. این آزمایش در قالب فاکتوریل سه عاملی بر پایه طرح کاملاً تصادفی با چهار تکرار و هر تکرار شامل شش ریزنمونه اجرا گردید. ریزنمونه ها هر دو هفته یک بار به محیط کشت جدید منتقل شدند. صفات درصد اندام زایی و تعداد شاخساره به ازای هر ریزنمونه پس از شش هفته یادداشت برداری شدند.

شاخساره های باززا شده برای ریشه زایی به محیط کشت MS ۱/۲ حاوی یک میلی گرم در لیتر تنظیم کننده رشدی IBA، دو درصد ساکارز و ۰/۸٪ آگار منتقل شدند. برای سازگاری گیاهان به شرایط محیطی آزاد نیز گیاهچه های ریشه دار شده به گلدان های کوچک حاوی بستر استریل متشکل از پرلیت و ورمی کولیت (۱:۱) انتقال یافت و به مدت یک هفته با محلول هوگلند آبیاری شدند. در این مرحله گلدان ها درون پوشش پلاستیکی قرار گرفتند و با گذشت زمان به حذف تدریجی پوشش پلاستیکی اقدام شد. پس از استقرار کامل گیاه، انتقال به بستر طبیعی (شن و ماسه با خاک زراعی) صورت گرفت (شکل ۵- G، H و I).

برای تجزیه آماری داده ها، ابتدا مفروضات تجزیه واریانس مورد بررسی قرار گرفتند. با توجه به نرمال نبودن توزیع انحرافات، از تبدیل به زاویه داده ها استفاده گردید. همچنین با توجه به مشابه بودن نتایج، از داده های اصلی در تجزیه ها و رسم نمودارها استفاده گردید. تجزیه آماری در قالب فاکتوریل سه عاملی بر پایه طرح کاملاً تصادفی صورت گرفت. مقایسه میانگین ها توسط آزمون دانکن در سطح احتمال ۱٪ انجام شدند. برای تجزیه و تحلیل داده ها در این پژوهش از نرم افزار MSTATC و برای رسم نمودارها از نرم افزار Excel استفاده گردید. همچنین برای محاسبه صفات مورد مطالعه از رابطه های زیر استفاده شد:

$$\text{درصد اندام زایی} = (\text{تعداد کل ریز نمونه ها} / \text{تعداد ریزنمونه های باززا شده}) \times 100$$

$$\text{تعداد شاخساره باززا شده به ازای هر ریزنمونه} = (\text{تعداد کل ریزنمونه ها} / \text{تعداد کل شاخساره های باززا شده})$$

Results and Discussion

نتایج و بحث

بذور سویا (ویلیامز، ساری و DPX) چهار روز پس از کشت در محیط MS، جوانه زده و شروع به رشد کردند. ریزنمونه ها (هیپوکوتیل و کوتیلدون و برگچه اولیه) از جوانه های استریل جدا شده و در محیط کشت MS حاوی تنظیم کننده های رشد گیاهی مختلف کشت شدند (شکل ۵- C).

تجزیه واریانس داده ها برای صفات اندام زایی در محیط کشت MS دارای غلظت های مختلف هورمونی نشان داد که برهم کنش رقم، ریزنمونه و ترکیب مواد تنظیم کننده رشدی و همه اثرات متقابل دو جانبه و سه جانبه در سطح احتمال یک درصد برای همه صفات مورد مطالعه دارای اختلاف معنی دار بودند (جدول ۱).

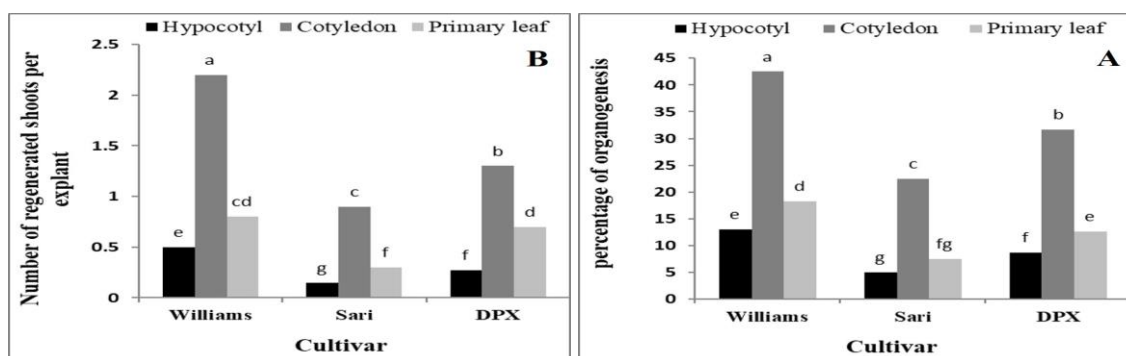
جدول ۱- تجزیه واریانس صفات مورد مطالعه در اندام‌زایی درون شیشه‌ای سویا.

Table 1. Analysis of variance of the studied traits in in vitro organogenesis of soybean

MS		df	S.O.V
Number of shoot per explant	Percentage of organogenesis		
30.48**	557.43**	2	Cultivar
37.67**	903.7**	2	Explant
48.28**	368.53**	12	Hormonal treatment
13.61**	148.6**	4	Cultivar× Explant
11.52**	42.06**	24	Cultivar× Hormonal treatment
8.08**	34.76**	24	Explant× Hormonal treatment
3.73**	9.06**	48	Cultivar× Explant× Hormonal treatment
0.94	2.13	351	Error
13.5	18.1		(%) CV

** : Significant at 0.01 probability levels. ** معنی داری در سطوح احتمال ۱ درصد.

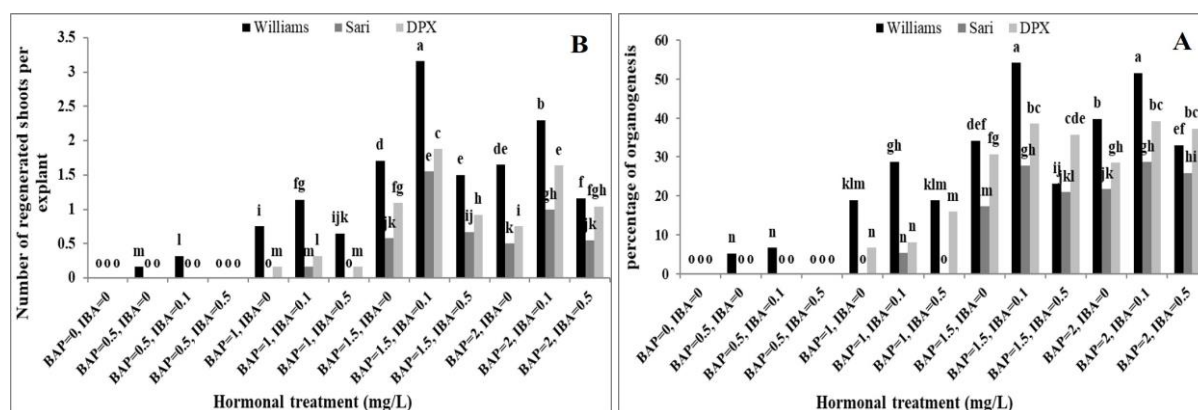
به منظور برآورد اثرات عوامل مورد مطالعه، مقایسه میانگین داده‌ها با روش دانکن برای صفات مذکور انجام شد. با توجه به معنی‌داری اثرات متقابل دو جانبه و سه جانبه، مقایسه میانگین اثرات اصلی کنار گذاشته شدند. مقایسه میانگین اثرات متقابل دو جانبه نشان داد، همه اثرات متقابل دو جانبه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بودند. بررسی مقایسه میانگین اثر متقابل رقم با ریزنمونه نشان داد که بیشترین درصد اندام‌زایی (۴۱ درصد) و تعداد شاخساره به ازای هر ریزنمونه (۲/۲) مربوط به ریزنمونه کوتیلدون رقم ویلیامز بود و کمترین درصد اندام‌زایی (۵ درصد) و تعداد شاخساره به ازای هر ریزنمونه در ریزنمونه هیپوکوتیل رقم ساری مشاهده شد (شکل ۱). مقایسه میانگین اثر متقابل رقم با ترکیب هورمونی نشان داد که بیشترین درصد اندام‌زایی (۵۳ درصد) در رقم ویلیامز و در محیط‌های حاوی ۱/۵ و ۲ میلی گرم در لیتر BAP به همراه ۰/۱ میلی گرم در لیتر IBA حاصل شد. همچنین بیشترین تعداد شاخه تشکیل شده به ازای هر ریزنمونه (۳/۱) در رقم ویلیامز و در محیط حاوی ۱/۵ میلی گرم در لیتر BAP به همراه ۰/۱ میلی گرم در لیتر IBA بدست آمد (شکل ۲). بررسی اثر متقابل ریزنمونه با ترکیب هورمونی نیز نشان داد بیشترین درصد اندام‌زایی (۷۶ درصد) و تعداد شاخساره باززا شده به ازای هر ریزنمونه (۳/۹) مربوط به ریزنمونه کوتیلدون در محیط کشت حاوی ۱/۵ میلی گرم در لیتر BAP به همراه ۰/۱ میلی گرم در لیتر IBA بود (شکل ۳).



شکل ۱- مقایسه میانگین اثر متقابل رقم و ریزنمونه بر درصد اندام‌زایی (A) و تعداد شاخساره تشکیل شده به ازای هر ریزنمونه (B).

Fig 1. Mean comparisons of the percentage of organogenesis (A) and number of regenerated shoots per explant (B) of the interaction between cultivar and explant

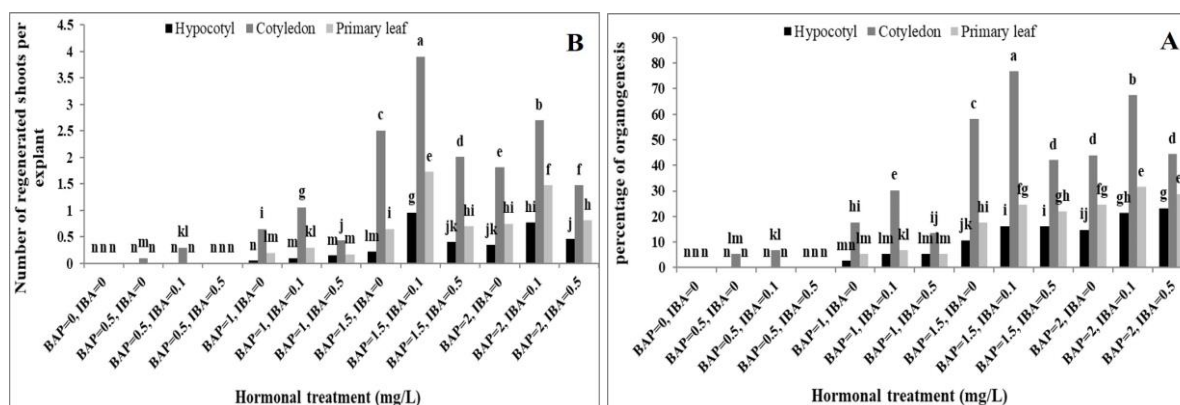
*حروف مشابه نشان دهنده عدم وجود اختلاف معنی دار در سطح یک درصد می باشد



شکل ۲- مقایسه میانگین اثر متقابل رقم و تیمار تنظیم کننده رشد گیاهی بر درصد اندام‌زایی (A) و تعداد شاخساره تشکیل شده به ازای هر ریزنمونه (B).

Fig 2. Mean comparisons of the percentage of organogenesis (A) and number of regenerated shoots per explant (B) of the interaction between cultivar and hormonal treatment

*حروف مشابه نشان دهنده عدم وجود اختلاف معنی دار در سطح یک درصد می باشد

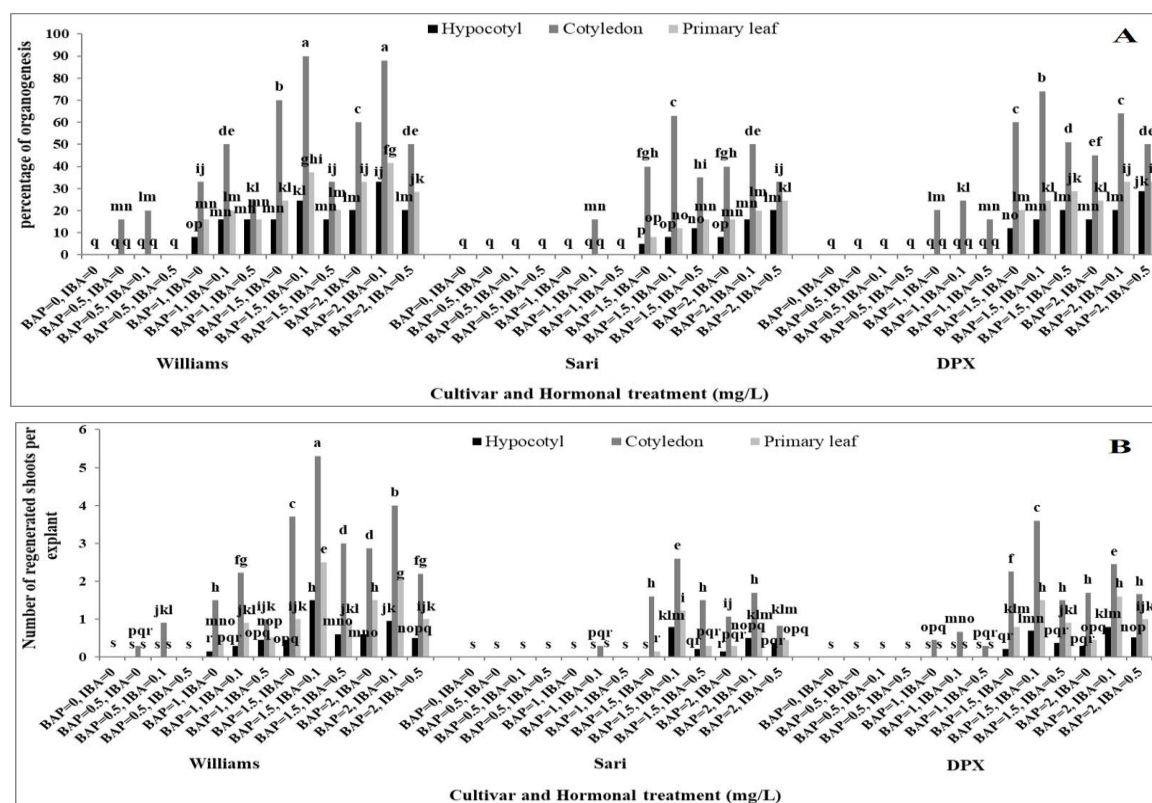


شکل ۳- مقایسه میانگین اثر متقابل ریزنمونه و تیمار تنظیم کننده رشد گیاهی بر درصد اندام‌زایی (A) و تعداد شاخساره تشکیل شده به ازای هر ریزنمونه (B).

Fig 3. Mean comparisons of the percentage of organogenesis (A) and number of regenerated shoots per explant (B) of the interaction between explant and hormonal treatment

*حروف مشابه نشان دهنده عدم وجود اختلاف معنی دار در سطح یک درصد می باشد

مقایسه میانگین اثر متقابل سه جانبه رقم، ریزنمونه و تیمار هورمونی نشان داد، افزایش غلظت تنظیم کننده رشدی سیتوکینین BAP تاثیر مثبتی بر روی اندام‌زایی ریزنمونه‌های مختلف ارقام سویا داشت ولی افزایش غلظت IBA تاثیر منفی روی اندام‌زایی به همراه داشت. بهترین ترکیب هورمونی برای شاخه‌زایی در سویا در ارقام مورد مطالعه ترکیب غلظت بالای BAP با غلظت حداقلی اکسین IBA بود. به طوریکه بیشترین درصد اندام‌زایی (۹۰ درصد) مربوط به ریزنمونه کوتیلدون رقم ویلیامز کشت شده در محیط‌های حاوی ۱/۵ و ۲ میلی گرم در لیتر BAP به همراه ۰/۱ میلی گرم در لیتر IBA بدست آمد (شکل ۴- A). همچنین بیشترین تعداد شاخساره تشکیل شده (۵/۳) برای ریزنمونه کوتیلدون رقم ویلیامز در محیط MS حاوی ۱/۵ میلی گرم در لیتر BAP به همراه ۰/۱ میلی گرم در لیتر IBA بود (شکل ۴- B).



شکل ۴- مقایسه میانگین اثر متقابل رقم، ریزنمونه و تیمار تنظیم کننده رشد گیاهی بر درصد اندام‌زایی (A) و تعداد شاخساره تشکیل شده به ازای هر ریزنمونه (B).

Fig 4. Mean comparisons of the percentage of organogenesis (A) and the number of regenerated shoots per explant (B) of the threefold interaction of cultivar, explant and hormonal treatment

*حروف مشابه نشان دهنده عدم وجود اختلاف معنی دار در سطح یک درصد می باشد.

در این مطالعه ظرفیت شاخه‌زایی سه رقم سویای تجاری در ایران با استفاده از سه ریزنمونه مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. هرچند برخی گزارشات جوانه زنی بذور سویا در محیط حاوی سیتوکینین را توصیه می‌کنند (Raza *et al.*, 2017) ولی در این مطالعه بذور سویا در محیط کشت بدون سیتوکینین جوانه‌زنی خوبی را به همراه کیفیت مناسب ریزنمونه‌های مورد نیاز داشتند (شکل ۵- A و B). همه ریزنمونه‌ها در عرض یک هفته پس از کشت در محیط‌های کشت اندام‌زایی شروع به انبساط و تورم کردند. متعاقباً با گذشت زمان القای جوانه شاخه یا کالوس در ریزنمونه‌ها شروع شدند. پس از دو مرحله واکشت، ریزنمونه‌های دارای کالوس که شاخساره ایجاد نکرده بودند به رنگ قهوه‌ای تیره درآمده و حذف شدند.

قابلیت اندام‌زایی ژنوتیپ‌ها و ریزنمونه‌ها در محیط‌های مختلف متفاوت بود. بیشترین اندام‌زایی در رقم ویلیامز با استفاده از ریزنمونه کوتیلدون در حضور غلظت بالای سیتوکینین و مقدار حداقلی اکسین مشاهده شد. این افزایش در رقم ویلیامز بیشتر از دو رقم DPX و ساری بود. همچنین ریزنمونه‌های کوتیلدون در مقایسه با سایر ریزنمونه‌ها در این زمینه بازدهی بیشتری داشته و تعداد شاخه‌های باززا شده در ریزنمونه‌های کوتیلدون به صورت قابل توجهی بیشتر از ریزنمونه‌های هیپوکوتیل و برگچه اولیه بودند. کمترین میزان شاخه‌زایی در ریزنمونه هیپوکوتیل مشاهده شد (شکل ۵- D, E و F).

تفاوت میزان اندام‌زایی بین ارقام مختلف ممکن است به دلیل وجود سطوح مختلف هورمون‌های درون‌زا و مواد غذایی در بخش‌های مختلف ریزنمونه‌ها باشد، که واکنش ارقام مختلف به شاخه‌زایی را تحت تأثیر قرار داده باشند (Khai *et al.*, 2021; Saeedpour *et al.*, 2021). همچنین همه سلول‌ها از توانایی یکسانی برای تبدیل شدن به گیاه کامل برخوردار نیستند و در اکثر مطالعات از سلول‌ها یا بافت‌هایی با سرعت رشد و تقسیم بالا به عنوان ریزنمونه استفاده می‌کنند. ماهیت و منشأ ریزنمونه نقش عمده‌ای در موفقیت کشت درون‌شیشه‌ای گیاهان

ايفا مي كنند (Martini et al., 2022). صرف نظر از نوع ريزنمونه، معمولاً تقسيم سلولي اوليه از بخش هاي جوان و نزديك كامبيوم و دستجات آوندي شروع مي شود (Lee et al., 2020). همچنين بخش اصلي ساختار گياهان جوان، بافت هاي پارانشيمي است و سلول ها در اين بافت ها، كم و بيش وضعيت مريستمي دارند كه معمولاً انعطاف پذيري بيشترى در شرايط درون شيشه اي از خود نشان مي دهند (Yang et al., 2009; Long et al., 2022).

باززايي گياهان تحت تاثير عوامل مختلفي از جمله ژنوتپ گياهي، نوع ريزنمونه، محيط كشت، تنظيم كننده هاي رشد گياهي و غيره قرار دارند (Raza et al., 2019). در اين ميان، ژنوتپ نقش اساسي را در باززايي ايفا مي كند كه براي هر گونه بايد شرايط كشت بافت، جهت باززايي بهينه شود (Sehaole and Mangena, 2024). گزارشات متعدد بر اين نكته تأكيد دارند كه باززايي در سويا به شدت وابسته به ژنوتپ است، حتي نوع و سن ريزنمونه نيز در باززايي سويا مؤثر مي باشند (Vargas-Almendra et al., 2024). پژوهشگران از قسمت هاي مختلف سويا از جمله هيپوكوتيل، كوتيلدون، جنين و غيره به عنوان ريزنمونه براي باززايي سويا استفاده کرده اند (Xu et al., 2022). فرانكلين و همكاران (Franklin et al., 2004) گزارش کرده اند كه ميزان باززايي هيپوكوتيل به مراتب بيشتر از ريزنمونه كوتيلدون است. همچنين ليو و همكاران (Liu et al., 2004) براي باززايي و تراريختي برخي ارقام چيني سويا، از ريزنمونه مريستم ساقه استفاده کرده اند. در حاليكه تيواري و همكاران (Tiwari et al., 2023) ريزنمونه كوتيلدون را مناسب براي باززايي و تراريختي سويا گزارش کرده اند.

رازا و همكاران (Raza et al., 2017) تاثير ژنوتپ و ريزنمونه بر القاي باززايي، با استفاده از ريزنمونه هاي مختلف ۹ رقم سوياي استراليائي را مورد بررسي قرار دادند. نتايج نشان دهنده نقش مهم ژنوتپ و ريزنمونه در فرايند باززايي سويا بودند. به طوريكه بيشترين ميزان باززايي را در رقم Bunya با استفاده از ريزنمونه هيپوكوتيل و رقم PNR791 با ريزنمونه كوتيلدون گزارش کرده اند. همچنين در برخي گزارشات، ريزنمونه كوتيلدون بيشترين كارايي را در باززايي و انتقال ژن به سويا داشته است (Xu et al., 2022). نتايج مطالعه ما در سه ژنوتپ مورد نظر، مطابق با نتايج بدست آمده از اين دو گروه بودند و رقم ويليامز با استفاده از ريزنمونه كوتيلدون با اختلاف زيادي بهترين ژنوتپ و ريزنمونه از نظر ميزان اندام زايي بودند.

در اين پژوهش اندام زايي در سويا تحت تاثير غلظت و نوع تنظيم كننده هاي رشد گياهي قرار داشت. به طوريكه با افزايش غلظت BAP شاهد افزايش شاخه زايي و با افزايش غلظت IBA شاهد كاهش شاخه زايي در ريزنمونه هاي مختلف ارقام مورد مطالعه بوديم. تنظيم كننده هاي رشد گياهي از ديگر عوامل مؤثر در باززايي گياهان بشمار مي آيند. وجود غلظت متعادل از سيتوكينين ها و اكسين ها نقش بسزايي در تمايز سلولي و باززايي گياهان دارند. سيتوكينين ها به ويژه BAP معمولاً موجب تحريك سلول ها شده و نقش بسيار مهمي در شاخه زايي بسياري از گونه هاي گياهي ايفا مي كنند (Muzika et al., 2024). منگنا و همكاران (Mangena et al., 2015) گزارش کرده اند كه در سويا علاوه بر ژنوتپ و ريزنمونه، تنظيم كننده هاي رشد گياهي نيز در باززايي مؤثر مي باشند و استفاده از BAP در مقايسه با تركيب آن با KIN در القاي شاخه زايي مؤثرتر بوده است.

پات و همكاران (Phat et al., 2015) بيشترين ميزان شاخه زايي دو رقم كره اي سويا را در ريزنمونه كوتيلدون و در غلظت يك ميلي گرم در ليتر BAP گزارش کرده اند. بگوم و همكاران (Begum et al., 2019) از بين تنظيم كننده هاي مختلف رشد، بيشترين ميزان باززايي رقم BARI-5 سويا را در ريزنمونه كوتيلدون و غلظت ۱/۵ ميلي گرم در ليتر BAP مشاهده کرده اند. كه با نتايج ما مطابقت دارد. همچنين منگنا (Mangena, 2021) از غلظت ۸/۸۷ ميكرومولار BAP براي شاخه زايي سويا استفاده کرده اند. در حالي كه ما و وو (Ma and Wu, 2008) بيشترين ميزان القاي شاخه سويا را در غلظت ۰/۴ ميلي گرم در ليتر BAP اعلام کرده اند. شان و همكاران (Shan et al., 2005) بيشترين ميزان القاي شاخه را در غلظت يك ميلي گرم در ليتر TDZ گزارش کرده اند. رازا و همكاران (Raza et al., 2017) استفاده از تركيب يك ميلي گرم در ليتر زآتين به همراه ۰/۱ ميلي گرم در ليتر IAA را براي باززايي سويا توصيه کرده اند. همچنين خان و همكاران (Khan et al., 2024) تركيب

۱/۳ میلی گرم در لیتر BAP با ۰/۳ میلی گرم در لیتر KIN و ۰/۳ میلی گرم در لیتر جیبرلیک اسید را برای باززایی ریزنمونه کوتیلدون سویا استفاده کرده‌اند.

در این مطالعه بهترین ترکیب هورمونی برای شاخه‌زایی سویا در ارقام مورد مطالعه، ترکیب غلظت بالای BAP با حداقل غلظت اکسین IBA بود. هرچند بیشترین میزان اندام‌زایی در ترکیب BAP و IBA حاصل شد، ولی محیط بدون اکسین با سطوح بالای BAP نیز شاخه‌زایی خوبی را نشان داد و در جایگاه دوم اندام‌زایی قرار داشت. البته نتایج این پژوهش در مقایسه با مطالعات دیگری که منحصر از BAP استفاده کرده بودند، هم از نظر تعداد شاخه باززا شده و هم کیفیت شاخه‌های تولیدی به مراتب بهتر بود. اکسین‌ها یکی از مهمترین تنظیم کننده‌های رشد گیاهی هستند که در جنین‌زایی بسیاری از گونه‌ها در کشت بافت نقش تعیین کننده‌ای دارند. اگرچه جنین‌زایی سوماتیکی توسط اکسین بیرونی آغاز می‌شود، ولی وقوع بیشتر آن نیازی به اکسین ندارد. می‌توان چنین استدلال کرد، احتمالاً اکسین بیرونی سنتز اکسین درونی را تقویت می‌کند و در نتیجه افزایش اکسین درونی باعث جنین‌زایی و باززایی می‌شوند (Long et al., 2022).



شکل ۵- مراحل مختلف کشت بافت سویا. (A) جوانه‌زنی بذور سویا در شرایط درون‌شیشه‌ای، (B) نهال‌های جوانه‌زده سویا، (C) کشت ریزنمونه‌های مختلف سویا، (D) باززایی شاخساره از ریزنمونه کوتیلدون رقم ویلیامز، (E) باززایی شاخساره از ریزنمونه هیپوکوتیل رقم ویلیامز، (F) باززایی شاخساره از ریزنمونه برگچه اولیه رقم ویلیامز، (G) ریشه‌زایی شاخساره‌های تشکیل شده، (H) سازگاری گیاهچه‌های ریشه‌دار، (I) انتقال گیاهچه‌های ریشه‌دار به خاک.

Fig 5. Different stages of soybean tissue culture. A) Germination of soybean seeds in in vitro, B) Seedlings of germinated soybean, C) Cultivation of different soybean explants, D) Shoot regeneration from cotyledon explant of Williams cultivar, E) Shoot regeneration from hypocotyl explant of Williams cultivar, F) Shoot regeneration from primary leaf explant of Williams cultivar, G) Rooting of formed shoots, H) Acclimation of rooted plantlets, I) Transfer of rooted plantlets to soil.

نتیجه‌گیری: با توجه به اهمیت تولید سویا در کشور و با در نظر گرفتن این مطلب که فراوانی اندام‌زایی در حبوبات تحت تأثیر ژنوتیپ است و از طرفی فقدان اطلاعات مورد نیاز در مورد ارقام تجاری کشت شده در ایران، بهینه‌سازی شاخه‌زایی درون‌شیشه‌ای ارقام مختلف سویا امری ضروری به نظر می‌رسد. نتایج این مطالعه نشان داد که هرچند رقم ویلیامز به خاطر میزان اندام‌زایی درون‌شیشه بالایی که دارد یک رقم مناسب برای انتقال ژن به سویا می‌باشد، ولی ارقام DPX و ساری نیز به عنوان ارقام پر محصول از قابلیت اندام‌زایی نسبتاً مناسبی برخوردار هستند و می‌توانند در برنامه‌های اصلاح ژنتیکی سویا مورد استفاده قرار گیرند. ریزنمونه کوتیلدون به خاطر درصد بالای شاخه‌زایی و تعداد شاخه باززا شده بیشتر به ازای ریزنمونه، بهترین ریزنمونه در کشت بافت سویا می‌باشد. همچنین استفاده از ترکیبات مختلف اکسین و سیتوکینین نشان داد که استفاده از یک اکسین ضعیف با غلظت بسیار پایین در کنار سیتوکینین، قدرت اندام‌زایی درون‌شیشه‌ای سویا را به صورت معنی‌داری بهبود بخشید.

تقدیر و تشکر: از معاونت پژوهشی دانشگاه تبریز به خاطر تامین هزینه این مطالعه از محل اعتبارات پژوهشی دانشگاه تقدیر و تشکر می-شود.

References

منابع

- Arun, M., Chinnathambi, A., Subramanyam, K., Karthik, S., Sivanandhan, G., Theboral, J., Alharbi, S. A., Kim, C. K., & Ganapathi, A. (2016). Involvement of exogenous polyamines enhances regeneration and Agrobacterium-mediated genetic transformation in half-seeds of soybean. *Biotechnology Journal*, 6(2), 1-12. doi:10.1007/s13205-016-0448-0
- Babaei, S., Ebrahimie, E., Niazi, A., & Nezamivand Chegini, M. (2021). Identification of soybean circular RNAs in response to low nitrogen and phosphorus stresses. *Genetic Engineering and Biosafety Journal*, 9(2), 105-115. doi:20.1001.1.25885073.1399.9.2.3.8 [In Persian]
- Begum, N., Zenat, E. A., Sarkar, M. K. I., Roy, C. K., Munshi, J. L., & Jahan, M. A. A. (2019). In vitro micro propagation of soybean (*Glycine max*) BARI-5 variety. *Open Microbiology Journal*, 13, 177-187. doi:10.2174/1874285801913010177
- Franklin, G., Carpenter, L., & Davis, E. (2004). Factors influencing regeneration of soybean from mature and immature cotyledons. *Plant Growth Regulation*, 43, 73-79. doi:10.1023/B: GROW. 0000038359. 86756. 18
- Khai, H. D., Bien, L. T., Vinh, N. Q., Dung, D. M., Nghiep, N. D., Mai, N. T. N., Tung, H. T., Luan, V. Q., Cuong, D. M., & Nhut, D. T. (2021). Alterations in endogenous hormone levels and energy metabolism promoted the induction, differentiation and maturation of Begonia somatic embryos under clinorotation. *Plant Science*, 312, 1-10. doi:10.1016/j.plantsci.2021.111045
- Khan, M. W., Shaheen, A., Zhang, X., Zhang, J., Dewir, Y. H., & Magyar-Tabori, K. (2024). Generation and assessment of soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) hybrids for high-efficiency *Agrobacterium*-mediated transformation. *Life*, 14(12), 1-13. doi:10.3390/life14121649
- Lee, M. H., Lee, J., Jie, E. Y., Choi, S. H., Jiang, L., Ahn, W. S., Kim, C. Y., & Kim, S. W. (2020). Temporal and spatial expression analysis of shoot-regeneration regulatory genes during the adventitious shoot formation in hypocotyl and cotyledon explants of tomato (Cv. Micro-Tom). *International Journal of Molecular Sciences*, 21(15), 1-17. doi:10.3390/ijms21155309
- Liu, H. K., Yang, C., & Wie, Z. M. (2004). Efficient *Agrobacterium tumefaciens* mediated transformation of soybeans using an embryonic tip regeneration system. *Planta*, 219(6), 1042-1049. doi:10.1007/s00425-004-1310-x
- Long, Y., Yang, Y., Pan, G. and Shen, Y. (2022). New insights into tissue culture plant-regeneration mechanisms. *Frontiers in Plant Science*, 13, 1-15. doi:10.3389/fpls.2022.926752
- Ma, X. H., & Wu, T.L. (2008). Rapid and efficient regeneration in soybean [*Glycine max* (L.) Merrill] from whole cotyledonary node explants. *Acta Physiologiae Plantarum*, 30, 209-216. doi:10.1007/s11738-007-0109-3
- Mangena, P. (2021). Analysis of correlation between seed vigour, germination and multiple shoot induction in soybean (*Glycine max* L. Merr.). *Heliyon*, 7(9), 1-9. doi:10.1016/j.heliyon.2021.e07913
- Mangena, P., Mokwala, P. W., & Nikolova, R. V. (2015). In vitro multiple shoot induction in soybean. *International Journal of Agriculture and Biology*, 17, 838-842. doi:10.17957/IJAB/ 14.0006.
- Martini, A. N., Vlachou, G., & Papafotiou, M. (2022). Effect of explant origin and medium plant growth regulators on in vitro shoot proliferation and rooting of *Salvia tomentosa*, a native sage of the northeastern Mediterranean basin. *Agronomy*, 12(8), 1-17. doi:10.3390/agronomy12 081889
- Mehrizadeh, V., Dorani, E., Mohammadi, A., & Ghareyazi, B. (2021). Study on the factors affecting *Agrobacterium*-mediated transformation of soybean. *Genetic Engineering and Biosafety Journal*, 9(2), 225-236. doi: 20.1001.1.25885073.1399.9.2.13.8 [In Persian]
- Murashige, T., & Skoog, F. (1962). A revised medium for rapid growth and bioassays with tobacco cultures. *Plant Physiology*, 15(3), 473-497. doi:10.1111/j.1399-3054.1962.tb08052.x
- Muzika, N. S., Kamai, T., Williams, L. E., & Kleiman, M. (2024). Characterization of gelling agents in callus inducing media: Physical properties and their effect on callus growth. *Physiologia Plantarum*, 176(2), 1-13. doi:10.1111/ppl.14312
- Phat, P., Rehman, S. U., Jung, H. I., & Ju, j. (2015). Optimization of soybean (*Glycine max* L.) regeneration for korean cultivars. *Pakistan Journal of Botany*, 47(6), 2379-2385.

- Rao, S. S., & Hildebrand, D. (2009). Changes in oil content of transgenic soybeans expressing the yeast SLC1 gene. *Lipids*, 44(10), 945-951. doi:10.1007/s11745-009-3337-z
- Raza, G., Singh, M. B., & Bhalla, P. L. (2017). In Vitro plant regeneration from commercial cultivars of soybean. *BioMed Research International*, 1, 1-9. doi:10.1155/2017/7379693
- Raza, G., Singh, M. B., & Bhalla, P. L. (2019). Somatic embryogenesis and plant regeneration from commercial soybean cultivars. *Plants*, 9(1), 1-10. doi:10.3390/plants9010038
- Saeedpour, A., Jahanbakhsh-Godehkahriz, S., Lohrasebi, T., Esfahani, K., Salmanian, A. H., & Razavi, K. (2021). The effect of endogenous hormones, total antioxidant and total phenol changes on regeneration of barley cultivars. *Iranian Journal of Biotechnology*, 19(1), 30-39. doi:10.30498/IJB.2021.2838
- Sehaole, E. M. K., & Mangena, P. (2024). N6-benzyladenine (BAP)-based seed preconditioning enhances the shoot regeneration of seedling-derived explants for subsequent indirect gene transfer in soybeans (*Glycine max* [L.] Merrill.). *International Journal of Plant Biology*, 15(2), 254-266. doi:10.3390/ijpb15020022
- Shan, Z., Raemakers, K., Tzitzikas, E. N., Ma, Z., & Visser, R. G. F. (2005). Development of a highly efficient, repetitive system of organogenesis in soybean (*Glycine max* (L.) Merr). *Plant Cell Reports*, 24(9), 507-512. doi:10.1007/s00299-005-0971-7
- Sojkova, J., Zur, I., Gregorova, Z., Zimova, M., Matusikova, I., Mihalik, D., Kraic, J., & Moravcikova, J. (2016). In vitro regeneration potential of seven commercial soybean cultivars (*Glycine max* L.) for use in biotechnology. *Nova Biotechnologica et Chimica*, 15(1), 1-11. doi:10.1515/nbec-2016-0001
- Tiwari, R., Singh, A. K., & Rajam M. V. (2023). Improved and reliable plant regeneration and *Agrobacterium-mediated* genetic transformation in soybean (*Glycine max* L.). *Journal of Crop Science and Biotechnology*, 26(3), 1-10. doi:10.1007/s12892-022-00179-9
- Vargas-Almendra, A., Ruiz-Medrano, R., Nunez-Munoz, L. A., Ramirez-Pool, J. A., Calderon- Perez, B., & Xoconostle-Cazares, B. (2024). Advances in soybean genetic improvement. *Plants*, 13(21), 1-25. doi:10.3390/plants13213073
- Walne, C. H., Alsajri, F. A., Gajanayake, B., Lokhande, S., Seepaul, R., Wijewardana, C., & Reddy, K. R. (2020). In vitro seed germination response of corn, cotton, and soybean to temperature. *Journal of the Mississippi Academy of Sciences*, 65(3), 374-384
- Wang, Y., Li, Z., Chen, X., Gu, Y., Zhang, L., & Qiu, L. (2022). An efficient soybean transformation protocol for use with elite lines. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 151, 457-466. doi:10.1007/s11240-022-02312-6
- Xu, H., Guo, Y., Qiu, L., & Ran, Y. (2022). Progress in soybean genetic transformation over the last decade. *Frontiers in Plant Science*, 13, 1-33. doi:10.3389/fpls.2022.900318
- Yang, C., Zhao, T., Yu, D., & Gai, J. (2009). Somatic embryogenesis and plant regeneration in Chinese soybean (*Glycine max* L.) impacts of mannitol, abscisic acid, and explants age. *In Vitro Cellular and Developmental Biology-Plant*, 45(2), 180-188. doi:10.1007/s11627-009-9205-y
- Zhong, H., Li, C., Yu, W., Zhou, H. P., Lieber, T., Su, X., Wang, W., Bumann, E., Lunny-Castro, R.M., Jiang, Y., Gu, W., Liu, Q., Barco, B., Zhang, C., Shi, L., & Que, Q. (2024). A fast and genotype-independent in planta *Agrobacterium-mediated* transformation method for soybean. *Plant Communications*, 5(12), 1-13. doi:10.1016/j.xplc.2024.101063