

روش ارزیابی فعالیت مهارکننده‌های خاموشی ژن در گیاه با استفاده از دو پروتئین از ویروس برگ بادبزنی مو (GFLV)

A method for Evaluation of RNA Silencing Suppression Activity in Plants Using two Proteins of Grapevine Fanleaf Virus (GFLV)

سمیرا پاکباز^۱، مقصود پژوهنده^{۲*} و امید عینی گندمانی^۳

Pakbaz S.¹, Pazhouhandeh M.*² and Eini Gandomani O.³

۱- دانشجوی دکتری ویروس‌شناسی گیاهی گروه گیاهپزشکی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

۲- دانشیار گروه بیوتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان

۳- استادیار گروه گیاهپزشکی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، ایران

1. PhD student of Plant Virology, Plant Protection Dept., Agriculture Fac., University of Tabriz.

2. Associate Prof. Biotechnology Dept. Agriculture Fac., Azarbaijan Shahid Madani University.

3. Assistant Prof., Plant Protection Dept., Agriculture Fac., University of Zanjan. Iran

* نویسنده مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: pazhouhandeh@gmail.com

(تاریخ دریافت: ۹۵/۱/۳۰ - تاریخ پذیرش: ۹۵/۴/۵)

چکیده

مهارکننده‌های RNA Silencing در گیاهان، جانوران و بیشتر ویروس‌های بیماری‌زای گیاهی به خوبی توصیف شده‌اند و نیز شیوه شناسایی فعالیت مهارکنندگی خاموشی ژن یک پروتئین در سیستم گیاهی راه اندازی شده است. ویروس برگ بادبزنی مو (*Grapevine fanleaf* (GFLV) یکی از شایع‌ترین ویروس‌های شناخته شده مو در سراسر دنیا است که تا ۸۰ درصد خسارت می‌زند. این ویروس دویپکراهی با ژنوم RNA تک رشته‌ای در جنس *Nepovirus* و خانواده *Secoviridae* قرار دارد. ژن مهارکننده خاموشی در نپوویروس‌ها هنوز شناسایی نشده است و دانش ما از تعیین کننده‌های علایم و مهارکننده‌های خاموشی ویروس‌های این جنس خیلی محدود است. در این پژوهش ژن GFP در گیاهان *Nicotiana benthamiana* تراریخته با GFP خاموش شد و سپس توانایی پروتئین‌های پلیمراز (RdRp) و حرکتی GFLV در مهار سازوکار RNA Silencing ارزیابی شد. عملکرد این دو پروتئین با شاهدهای مثبت و منفی به کاربرده شده مقایسه شد و نتایج نشان داد که اگرچه این دو پروتئین در بروز علایم و سیستمیک شدن بیماری نقش دارند اما کارایی لازم را جهت مهارکنندگی خاموشی ندارند. این پژوهش مدل بررسی فعالیت ممانعت‌کنندگی از RNA Silencing را بیان می‌نماید.

واژه‌های کلیدی

RNA Silencing

مهار خاموشی ژن

ویروس برگ بادبزنی مو

مقدمه

سیستم بیان موقت ژن‌های بیگانه در بافت‌های گیاهی روشی ارزشمند در بیوتکنولوژی گیاهی است و برای تجزیه و تحلیل عملکرد ژن در زمان کوتاه روش کارآمدی می‌باشد. این روش برخلاف روش بیان دایم که زمان‌بر و مستلزم کار زیاد می‌باشد، روشی سریع، انعطاف پذیر، ساده، بی‌نیاز به کشت بافت و در بافت‌های گیاهی به طرز کامل تمایز یافته مانند برگ‌ها قابل اجرا می‌باشد. از بیان موقت بیشتر برای تأیید تراریختی و اثبات تولید پروتئین نو ترکیب و تجزیه و تحلیل پیش‌برهای گیاهی استفاده می‌شود. این روش مستقل از موقعیت استقرار ژن در کروموزوم است (Fischer et al., 1999) که در آن پروتئین مورد نظر در سطح بالایی بیان و در کوتاه‌ترین زمان ممکن تولید می‌شود (Yang et al., 2000; Goodin et al., 2002). روش بیان موقت بر پایه آگروباکتریوم جایگزین مناسبی برای روش‌های انتقال مستقیم DNA مانند بمباران ژنی و القاء پروتوپلاست‌ها برای مطالعات اولیه بوده و برخلاف آن‌ها که ژن مورد نظر را در تعداد کمی از سلول‌ها بیان می‌کنند، تلقیح (اینفیلتراسیون) آگروباکتریوم به داخل بافت‌های گیاهی، باعث بیان ژن در بیشتر سلول‌های گیاهی می‌شود (Kapila et al., 1997). به علاوه در اینفیلتراسیون مکانیکی تعداد نمونه‌هایی که به طور همزمان مطالعه می‌شوند، افزایش یافته و بافت مورد مطالعه می‌تواند بصورت فعال به گیاه متصل باقی بماند، در نتیجه در مواردی مانند تجزیه و تحلیل پیش‌برهای گیاهی، تیمارها بر روی بافت متصل به گیاه اعمال می‌شود (Cazonelli and Velten, 2006). بیان موقت در چندین گونه گیاهی به کار گرفته شده است ولی از بین آنها بیشترین گزارش‌ها در گیاه توتون *N. benthamiana* بوده است (Chakrabarty et al., 2007; Mokrzycki-Issartel et al., 2003). مزیت‌های استفاده از *N. benthamiana* برای بیان موقت پروتئین شامل موارد زیر است: اول اینکه یک گیاه مدل بوده و معمولاً در تمام آزمایشگاه‌های پژوهش‌های گیاهی به کار می‌رود و دوم اینکه پروتئین به راحتی در سطح بالا از طریق آگرواینفیلتراسیون در برگ‌های این گیاه بیان می‌شود (Voinnet et al., 2003; Ma et al., 2008). در بین ۶۴ گونه ویروسی آلوده کننده مو (Martelli, 2014)، ویروس برگ بادبزنی مو (GFLV) (*Grapevine fanleaf virus*)

یکی از شایع‌ترین ویروس‌های شناخته شده مو در سراسر دنیا است که تا ۸۰ درصد خسارت می‌زند و کیفیت و طول عمر مو را در تاکستان‌ها کاهش می‌دهد (Andret-Link et al., 2004). ویروس GFLV یک عضو دو پیکره‌ای با ژنوم دو قسمتی از زیر گروه A جنس *Nepovirus* و در خانواده *Secoviridae* است (Sanfacon et al., 2009). ویرونی‌های این ویروس ایزومتریکی بوده و حدود ۳۰ نانومتر قطر دارند. ژنوم ویروس از دو قطعه RNA تک رشته‌ای با قطبیت مثبت تشکیل شده است (+ssRNA) که در انتهای ۵' دارای پروتئین متصل به ژنوم ویروسی (Viral Protein genome-linked, VPg) و در انتهای ۳' به صورت پلی آدنینی (Poly A) هستند. هر قطعه محتوی یک چارچوب خواندنی باز است که یک پلی‌پروتئین را رمز می‌کند (P1 و P2). هر پلی‌پروتئین توسط پروتئینازی که توسط RNA1 رمز می‌شود، به پروتئین‌های کوچکتری شکسته می‌شود (Pinck et al., 1988). پلی‌پروتئین رمزشونده توسط RNA1 (P1)، به پنج پروتئین شکسته می‌شود که اجزاء تکثیر ویروس هستند و از انتهای آمینی به کربوکسیلی شامل یک کوفاکتور پروتئیناز فرضی، هلیکاز فرضی، پروتئین متصل به ژنوم ویروس، پروتئیناز سیستمین و RNA پلیمرز وابسته به RNA (RNA dependent RNA Polymerase, RdRp) است (Naraghi-Arani et al., 2001; Andret-Link et al., 2004). قطعه RNA2 پلی‌پروتئین P2 را رمز می‌کند که از انتهای آمینی به کربوکسیلی با فعالیت پروتئولیتیکی به ترتیب به سه پروتئین شامل $(2A)^{HP}$ که برای تکثیر RNA2 مورد نیاز است و می‌تواند به عنوان پروتئین خانگی عمل کند (Gaire et al., 1999)، پروتئین حرکتی $(2B)^{MP}$ که پروتئین اصلی مشاهده شده در پلاسمودسماتاست (Ritzenthaler et al., 1995) و پروتئین پوششی $(2c)^{CP}$ (Serghini et al., 1990) شکسته می‌شود. هر دو RNA ژنومی برای آلودگی سیستمیک گیاه ضروری هستند (Viry et al., 1993).

اگرچه در چندین ویروس گیاهی پیشرفت‌های قابل ملاحظه‌ای در شناسایی سازوکارهای بیان علایم به دنبال اثر متقابل گیاه-ویروس به دست آمده است، اما این سازوکارها هنوز به طور ناچیزی شناخته شده‌اند (Culver and Padmanabhan, 2007). چندین پروتئین ویروسی مثل پروتئین حرکتی (Lewsey et al.,

N. benthamiana و *N. clevelandii* آلودگی سیستمیک ایجاد می‌کنند، به طوری که حضور ویروس در برگ‌های تلقیح نشده بالایی توسط آزمون الایزا-Double Antibody Sandwich Enzyme-linked Immunosorbent Assay (DAS-ELISA) ردیابی شده است. نژاد GHu شش روز بعد از مایه‌زنی روی *N. benthamiana* زردی خفیف رگبرگ و به دنبال آن زردی نسبی برگ و پیسه‌ای شدن را نشان داد، همچنین شش روز بعد از مایه-زنی در *N. clevelandii* لکه‌های کلروز مشاهده شد که حداقل بیش از بیست روز پایدار بودند. در مقایسه، نژاد F13 هیچ‌گونه علائمی روی *N. benthamiana* و *N. clevelandii* ایجاد نکرد. تجزیه و تحلیل‌های نیمه‌کمی، هیچ‌گونه تمایز قابل ملاحظه‌ای در غلظت ویروس بین گیاهان آلوده شده با نوترکیب‌های مختلف که علائم ایجاد کردند و گیاهانی که فاقد علائم بودند، نشان ندادند (Vigne et al. 2013). در این پژوهش ضمن معرفی و راه‌اندازی یک سیستم جهت بررسی فعالیت ممانعت‌کنندگی از RNA Silencing، به بررسی این فعالیت در دو پروتئین از GFLV پرداخته می‌شود.

مواد و روش‌ها

مواد گیاهی، باکتریایی و وکتورها

در پژوهش حاضر، از لاین 16c گیاهان تراریخته *N. benthamiana* که بیان‌کننده پروتئین فلورسنت سبز (Green) GFP، Florescent Protein هستند، استفاده شد. همچنین از ویروس جغجغه‌ای توتون (*Tobacco Rattle Virus*, TRV) که به RNA2 آن (Enhanced-GFP, EGFP) افزوده شده است، به عنوان القاء‌کننده خاموشی ژن GFP استفاده شد (Ratcliff et al. 2001). RNA1 و RNA2 این ویروس به طور جداگانه به ناقل همسانه‌سازی pEPT8 و سپس ناقل بیان pGA482G منتقل شده و سلول‌های مستعد سویه GV3101 باکتری *Agrobacterium tumefaciens* با این ناقل نوترکیب تراریخت شدند (Larsen and Curtis, 2012). همچنین ژن‌های پروتئین حرکتی ^{MP} (2B) و پلیمرز ^{Pol} (1E) ویروس GFLV و نیز ژن 24p از *Grapevine* (*leafroll-associated Virus 2*, GLRaV-2) (Chiba et al. 2006) در ناقل نام‌برده همسانه‌سازی و سپس به سویه GV3101

(Shibolet et al. 2007)، پروتئین جزء کمکی پروتئیناز (Kagiwada et al. 2005)، پروتئین پوششی (Heaton et al. 1991) و پروتئین بیماری‌زایی (Jupin et al. 1992) به عنوان تعیین‌کننده‌های علائم شناسایی شده‌اند. تعدادی از پروتئین‌های ویروسی درگیر در بیان علائم شبیه HC-Pro در جنس *Potyvirus* ژن 2b در *Cucumovirus* P19، *Tombusvirus* P0، *Polerovirus* پروتئین ۱۳۰K در *Tobamovirus* و پروتئین پوششی جنس *Carmovirus*، مهارکننده‌های ویروسی خاموشی RNA (Voinnet et al. 2005)، اما دانش ما از تعیین‌کننده‌های علائم و مهارکننده‌های خاموشی ویروس‌های جنس نیپوویروس از خانواده *Secoviridae* خیلی محدود است و با اینکه مهارکننده‌های خاموشی (VSRs) در بیشتر ویروس‌های گیاهی به خوبی توصیف شده‌اند، اما در نیپوویروس‌ها هنوز ناشناخته مانده‌اند (Vigne et al. 2013). پدیده بهبود که به موجب آن تضعیف یا عدم بروز علائم در برگ‌های نوظهور به دنبال آلودگی و ظهور علائم بیماری اتفاق می‌افتد، ۸۷ سال پیش برای اولین بار در یک نیپوویروس توصیف شد (Wingard, 1928) و خاموشی ژن که یک واکنش دفاعی طبیعی گیاه است با این پدیده همراه است (Jovel et al. 2007). تعیین‌کننده‌هایی که تاکنون در مورد اعضاء *Secoviridae* شناسایی شده و سبب بروز علائم می‌شدند، پروتئین‌های درگیر در تکثیر و پلی‌پروتئین بالغ مثل هلیکاز نوع III و پروتئیناز سیستمین شبه 3C بودند (Fan et al. 2011; Gu and Ghabrial, 2005). پروتئین کامل ^{Pol}(1E) نژاد مجارستانی GHu ویروس GFLV بین ۳۹-۸۴ درصد با RdRp چندین ویروس در خانواده *Secoviridae* شباهت دارد. هفت موتیف حفاظت شده در RdRp به طور معمول برای ویروس‌های گیاهی توصیف شده است (Chisholm et al. 2007) که در بالادست ۱۳۶ اسیدآمینه انتهایی پروتئین ^{Pol}(1E) نژاد GHu ویروس GFLV قرار می‌گیرد (Letunic et al. 2012). وجود دومین‌های اختصاصی نژاد، روی ژن RNA پلیمرز وابسته به RNA (RdRp) ویروس GFLV تأیید و مشخص شده است که این دومین‌ها وظیفه تنظیم عوامل تعیین‌کننده علائم را دارند. هر دو نژاد GHu و F13 این ویروس روی

در زمانی انجام شد که این گیاهان در مرحله چهار برگی بودند و حداقل یک هفته از نشاء آن‌ها گذشته بود. گیاهان پس از تزریق در اتاقک رشد با دمای ۲۸ درجه سانتی‌گراد و ۱۶ ساعت نور و ۸ ساعت تاریکی و ۷۰٪ رطوبت نگهداری شدند.

بررسی تأثیر ویروس برگ بادبزنی مو (GFLV) در مهار خاموشی ژن

جهت مشاهده روند مهار بیان ژن GFP، گیاهان از روز سوم پس از تزریق به طور روزانه در زیر نور ماوراء بنفش بررسی شدند. پس از مشاهده تغییر رنگ سیستمیک گیاهان تراریخته از رنگ سبز به قرمز و اطمینان از وقوع خاموشی ژن پروتئین فلورسنت سبز، گیاهان تیمار شده در روز هفتم پس از تزریق، به سه گروه تقسیم شدند. یک گروه با برگ‌های *Chenopodium quinoa* آلوده به نژاد GFLV-F13 و یک گروه با نژاد GFLV-GHu به طور مکانیکی مایه‌زنی شدند. در گروه سوم مایه‌زنی با GFLV انجام نشد و به عنوان کنترل در نظر گرفته شد. از روز سوم پس از مایه‌زنی، همه گیاهان زیر نور ماوراء بنفش بررسی شدند. جهت تأیید حضور GFLV، یک هفته پس از مایه‌زنی استخراج RNA از برگ‌های نوظهور نمونه‌های مورد آزمایش انجام و سپس آزمون RT-PCR با استفاده از یک جفت آغازگر مربوط به RNA1 با توالی‌های Forward: 5' ARA GCC TCA AGA GTA AAG 3' (نوکلئوتیدهای ۱۷۴۴-۱۷۶۵) و Reverse: 5' GCC 3' (نوکلئوتیدهای ۲۹۴۴-۲۹۲۳) صورت گرفت.

بررسی تأثیر ژن پروتئین حرکتی و پلیمرز ویروس برگ بادبزنی مو (GFLV) در مهار خاموشی ژن

بر اساس نتایج آزمایش قبل، آزمایش دیگری جهت بررسی میزان عملکرد پروتئین دو ژن پلیمرز $(1E)^{Pol}$ و پروتئین حرکتی $(2B)^{MP}$ ویروس GFLV در مهار خاموشی ژن انجام شد. در این پژوهش لاین 16c گیاهان تراریخته یک هفته پس از نشاء و در مرحله ۴-۵ برگی مشابه آزمایش قبل توسط سلول‌های آگروباکتریوم حاوی سازه القاءکننده خاموشی TRV تیمار شدند. هشت روز پس از آگرواینفیلتراسیون با TRV، یک گروه از این گیاهان با سلول‌های آگروباکتریوم حاوی $pGA482G-(1E)^{Pol}$ و

باکتری *A. tumefaciens* انتقال داده شدند. جدایه‌های مربوط به ویروس‌های GFLV و GLRaV-2 توسط آزمایشگاه ویروس-شناسی دانشگاه کرنل امریکا در اختیار این پژوهش قرار گرفت.

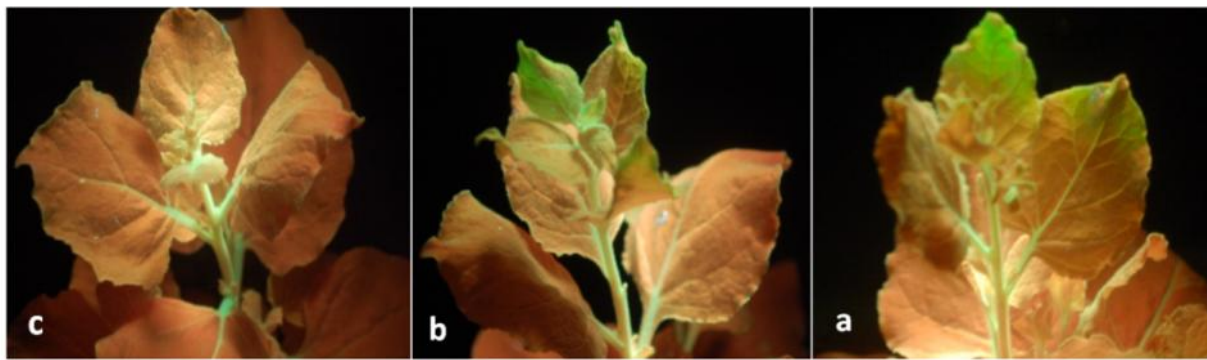
بیان موقت با استفاده از روش تزریق آگروباکتریوم

جهت انتقال سازه القاءکننده خاموشی ژن پروتئین فلورسنت سبز به گیاهان تراریخته لاین 16c، از آزمایش بیان موقت به روش تزریق آگروباکتریوم استفاده شد (Vaghchhipawala et al., 2010). بدین منظور سلول‌های آگروباکتریوم حاوی پلاسمید نوترکیب pGA482G-TRV_{RNA1} در ۵ میلی‌لیتر از محیط (LB) Luria Bertani حاوی آنتی‌بیوتیک‌های کانامایسین (۵۰ میلی‌گرم در میلی‌لیتر) و ریفامپیسین (۱۲/۵ میلی‌گرم در میلی‌لیتر) و سلول‌های آگروباکتریوم حاوی پلاسمید نوترکیب pGA482G-TRV_{RNA2:EGFP} در ۵ میلی‌لیتر از محیط LB حاوی آنتی‌بیوتیک جنتامایسین (۵۰ میلی‌گرم در میلی‌لیتر) کشت شدند و به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۲۸ درجه سانتی‌گراد و با ۲۲۵ دور در دقیقه در شیکر انکوباتور رشد داده شدند. جهت افزایش حجم سوسپانسیون باکتری، از محیط القاء حاوی یک میلی‌لیتر N-morpholino Ethane Sulfonic Acid (MES) نیم‌مولار (غلظت نهایی ۱۰ میلی‌مولار) و ۴۴ میلی‌لیتر محیط LB تازه استفاده شد. همچنین آنتی‌بیوتیک‌ها با غلظت‌های مناسب افزوده و سوسپانسیون به مدت یک شبانه روز در دمای ۲۸ درجه سانتی‌گراد و با نیروی ۲۲۵ دور در دقیقه در شیکر انکوباتور رشد داده شد. سپس سلول‌های باکتری با سانتریفیوژ در ۴۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۱۲ دقیقه در دمای اتاق رسوب داده شدند و پس از حذف محیط کشت، رسوب صورتی رنگ باکتری در ۱۰۰ میلی‌لیتر محیط اینفیلتراسیون حاوی MES ۱۰ میلی‌مولار و $MgCl_2$ ۱۰ میلی‌مولار معلق شد و به مدت ۲-۳ ساعت در دمای ۲۸ درجه سانتی‌گراد و با ۲۲۵ دور در دقیقه در شیکر انکوباتور رشد داده شد. سوسپانسیون باکتری با استفاده از محیط اینفیلتراسیون تا غلظت $Optical\ Density_{600}: 0.8-1$ رقیق شد. سپس سلول‌های آگروباکتریوم حاوی TRV_{RNA1} و TRV_{RNA2:EGFP} با حجم یکسان با هم مخلوط شدند. سوسپانسیون باکتری با استفاده از سرنگ پلاستیکی سه میلی‌لیتری درون فضای میان سلولی برگ‌های سالم و متصل به گیاهان تراریخته *N. benthamiana* تزریق شد.

نتایج و بحث

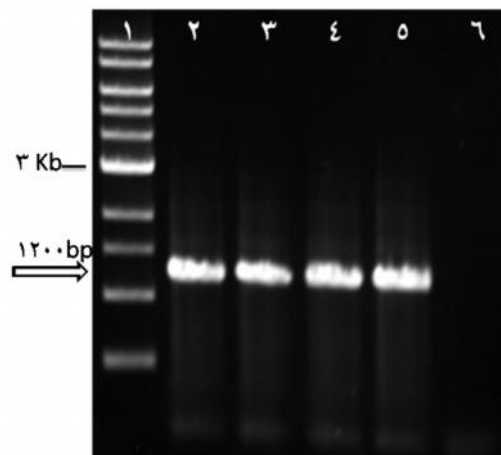
گروه دیگر با $pGA482G-(2B)^{MP}$ اگرواینفیلتراسیون شدند. همچنین یک گروه از گیاهان با سلول‌های آگروباکتریوم حاوی پلاسمید نو ترکیب $pGA482G-p24$ تیمار و به عنوان شاهد مثبت استفاده شدند. روی تعدادی از گیاهان تراریخت و تیمار شده با pTRV، تیمار دیگری انجام نشد و از این گیاهان به عنوان کنترل منفی استفاده شد. همچنین از رقم وحشی گیاهان *N. benthamiana* بدون انجام هیچ‌گونه تیماری، به عنوان کنترل منفی استفاده شد. از روز سوم تا هشتم پس از اگرواینفیلتراسیون دوم، همه گیاهان زیر نور ماوراء بنفش بررسی شدند. علاوه بر این در روزهای سوم و چهارم جهت تعیین میزان سطح فلورسنت، نمونه‌های برگ یک سانتیمتر مربعی جمع‌آوری شد. نمونه‌ها از نواحی اگرواینفیلتر شده و ترجیحاً از ناحیه سالم و خسارت ندیده در اثر انجام اگرواینفیلتراسیون انتخاب شدند. عصاره‌گیری نمونه‌ها با استفاده از بافر استخراج حاوی توئین ۲۰ انجام شد. سپس ۱۰۰ میکرولیتر از عصاره هر نمونه همراه با تکرار به چاهک‌های میکروپلیت اضافه شد. سطح فلورسنت با استفاده از دستگاه Synergy2 Microplate Reader (BioTek) و نشر در ۵۰۸ نانومتر اندازه‌گیری شد. میانگین داده‌های به دست آمده برای هر تیمار توسط روش آماری ANOVA در نرم افزار SPSS مقایسه شد ($P < 0.05$).

جهت انتقال سازه القاءکننده خاموشی ژن GFP به لاین 16c گیاهان تراریخت و همچنین بررسی فعالیت مهارکنندگی از خاموشی ژن، از آزمایش بیان موقت به روش تزریق آگروباکتریوم استفاده شد. پس از تیمار گیاهان تراریخت 16c با ویروس جغجغه‌ای توتون (TRV) حاوی سازه القاءکننده خاموشی ژن GFP، تغییر رنگ این گیاهان زیر نور ماوراء بنفش هر روز مشهودتر می‌شد. به طوری که پس از یک هفته، برگ‌ها به طور کامل به رنگ قرمز دیده می‌شدند و رنگ سبز تنها محدود به ساقه‌ها بود (شکل c-۱). این تغییر رنگ نشان دهنده وقوع خاموشی ژن پروتئین فلورسنت سبز است که در اثر مشابهت در توالی‌های ژن داخلی گیاه تراریخته (GFP) و ژن بیگانه که به طور موقت بیان شده، حاصل شده است و در نتیجه رنگ سبز فلورسنت پس از چند روز جای خود را به رنگ قرمز می‌دهد. در بررسی این گیاهان در روز سوم پس از مایه‌زنی با ویروس برگ بادبزی مو (GFLV) زیر نور ماوراء بنفش، تغییر رنگ به طور موضعی در برگ‌های مایه‌زنی شده دیده شد. از روز چهارم تا هشتم، تغییر رنگ از قرمز به سبز به طور سیستمیک در برگ‌های انتهایی گیاهان تراریخت نمایان شد و تا روز هشتم، هر روز به تعداد برگ‌های تغییر رنگ یافته در این گیاهان افزوده شد. این تغییر رنگ مجدد گیاه به سبز در برگ‌های نوظهور که نشان دهنده حضور سیستمیک GFLV در گیاه و نیز مهار خاموشی ژن بود، در گیاهان مایه‌زنی شده با هر دو نژاد F13 و GHu ویروس نمایان شد (شکل a, b-۱). این تغییر رنگ حاکی از عملکرد یک یا چند ژن از ویروس برگ بادبزی مو است که به عنوان مهارکننده خاموشی ژن در این ویروس عمل می‌کنند و توانسته‌اند خاموشی ژن پروتئین فلورسنت سبز را مهار کنند. همچنین نتایج آزمون RT-PCR، حضور GFLV را یک هفته پس از مایه‌زنی در این گیاهان تأیید کرد و آغازگرها توانستند قطعه‌ای به اندازه ۱۲۰۰ جفت باز از RNA1 این ویروس تکثیر کنند (شکل ۲).



شکل ۱- مایه‌زنی GFLV روی گیاهان تراریخته *N. benthamiana* و تیمار شده با ویروس جغجغه‌ای توتون (TRV). (a) مایه‌زنی با نژاد GFLV-F13. (b) مایه‌زنی با نژاد GFLV-GHu. (c) گیاه تراریخته *N. benthamiana* و تیمار شده با pTRV بدون مایه‌زنی با GFLV به عنوان کنترل.

Figure 1- GFLV inoculation on transgenic *N. benthamiana* and treated with pTRV. a) GFLV-F13 inoculation. b) GFLV-GHu inoculation. c) Transgenic *N. benthamiana* and treated with pTRV without GFLV inoculation as control.



شکل ۲- تجزیه و تحلیل RT-PCR گیاهان تراریخته تیمار شده با pTRV و مایه‌زنی شده با ویروس برگ بادبزنی مو با استفاده از آغازگرهای اختصاصی GFLV. ۱- نشانگر مولکولی یک کیلوبازی. ۲- ۳- قطعه تکثیر شده ۱۲۰۰ جفت بازی در گیاهان مایه‌زنی شده با نژاد F13. ۴- ۵- قطعه تکثیر شده ۱۲۰۰ جفت بازی در گیاهان مایه‌زنی شده با نژاد GHu. ۶- گیاه تیمار شده با TRV و بدون مایه‌زنی با GFLV به عنوان کنترل منفی.

Figure 2- RT-PCR analysis of treated transgenic plants with pTRV and inoculated by GFLV specific primers. 1-1kb DNA ladder. 2- 3- GFLV-F13 Inoculation. 4- 5- GFLV-GHu Inoculation. 6- Treated plant with TRV and without GFLV inoculation as negative control.

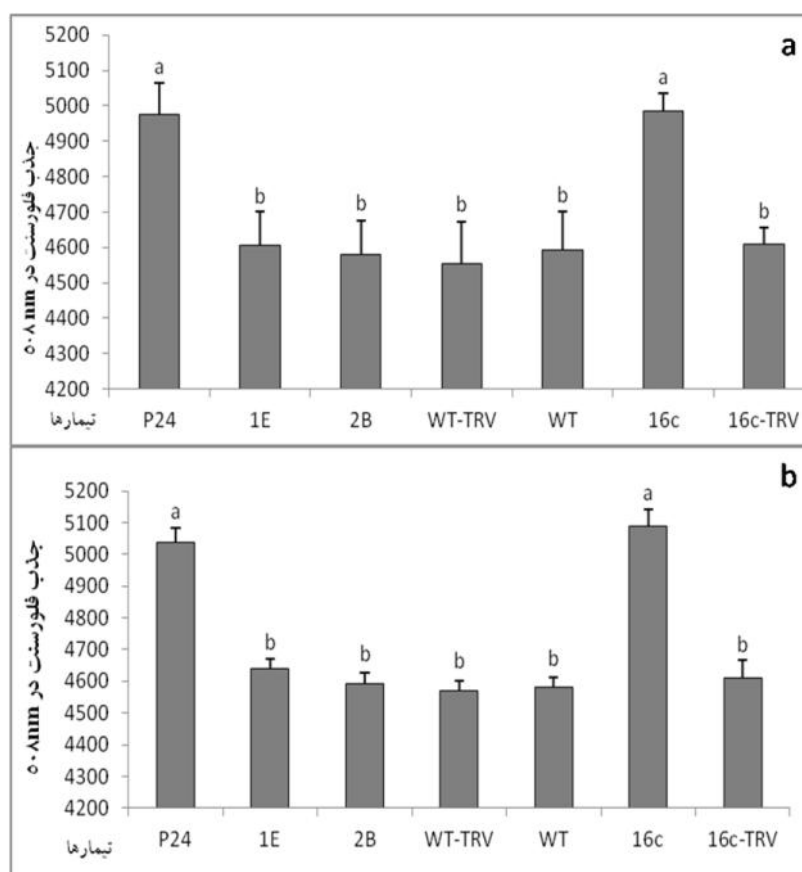
همچنین نتایج سنجش میزان فلورسنت با نتایج چشمی مطابقت داشت. این سنجش که در روزهای سوم و چهارم بعد از اگرواینفیلتراسیون با ژن‌های GFLV انجام شد، در هر دو روز متوالی نتایج یکسانی را در برداشت. نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل داده‌ها در سطح احتمال ۵٪ نشان داد که میزان جذب فلورسنت در نمونه‌های اگرواینفیلتر شده با ژن p24، مشابه نمونه‌های گیاهان تراریخت بیان کننده GFP (16c) بود و تفاوت معنی‌داری بین نمونه‌های این دو گروه وجود نداشت. در حالی که این دو گروه، تفاوت معنی‌داری با نمونه‌های $(1E)^{Pol}$ ، $(2B)^{MP}$ ، نمونه‌های تراریخت و تیمار شده با pTRV (16c-pTRV)، گیاهان وحشی (WT) و نیز گیاهان وحشی تیمار شده با pTRV (WT-) نشان دادند (شکل ۴- a, b).

در بررسی گیاهان 16c اگرواینفیلتر شده با سازه القاءکننده خاموشی و متعاقباً با سازه‌های حامل ژن‌های $(1E)^{Pol}$ و $(2B)^{MP}$ زیر نور ماوراءبنفش، هیچ‌گونه تغییر رنگی در ناحیه اگرواینفیلتراسیون شده در گیاهان مورد مطالعه مشاهده نشد (شکل ۳- c, d). در حالی که در گیاهان اگرواینفیلتراسیون شده با ژن p24، تغییر رنگ قابل ملاحظه‌ای نمایان شد و همه نواحی تیمار شده به طور واضح از رنگ قرمز به سبز تغییر رنگ دادند (شکل ۳- b). واضح است که هیچ‌گونه تغییر رنگی هم از رقم وحشی (شکل ۳- f) و نیز گیاه تراریخته *N. benthamiana* که با pTRV اگرواینفیلتر شده بودند (شکل ۳- a) انتظار نمی‌رفت. بررسی همه گیاهان از روز سوم تا هشتم پس از اگرواینفیلتراسیون زیر نور UV ادامه داشت ولی تغییر قابل ملاحظه‌ای ایجاد نشد.



شکل ۳- تیمار با سازه‌های حامل ژن‌های GFLV روی گیاهان تراریخته *N. benthamiana* (16c) و تیمار شده با pTRV. عکس‌ها در زیر نور ماوراء بنفش گرفته شده است. (a) گیاه 16c تیمار شده با pTRV بدون تیمار با ژن‌های GFLV. (b) تیمار با سازه حامل p24 به عنوان کنترل مثبت. (c) GFLV-(1E)^{Pol}. (d) GFLV-(2B)^{MP}. (e) گیاه 16c بدون تیمار به عنوان کنترل. (f) گیاه وحشی تیمار شده با pTRV (کاملاً مشابه با گیاه وحشی بدون تیمار).

Figure 3- Agroinfiltration with the constructs including GFLV genes on treated transgenic *N. benthamiana* with pTRV. Photographed under UV light. a) Treated 16c with pTRV and without treatment with GFLV genes. b) Treated with p24 as positive control. c) GFLV-(1E)^{Pol}. d) GFLV-(2B)^{MP}. e) The 16c plant without any treatment. e) The treated wild type plant with pTRV as control (The same with WT plant without treatment).



شکل ۴- سنجش سطح فلورسنت در گیاهان تراریخته 16c و تیمار شده با pTRV و سپس با ژنهای GFLV. حروف یکسان در نمودار نشان می‌دهد که تفاوت معنی‌داری در میزان جذب فلورسنت وجود ندارد ($P < 0.05$). (a) روز سوم پس از آگرواینفیلتراسیون با p24-GLRaV-2 و سازه‌های GFLV. (b) روز چهارم پس از آگرواینفیلتراسیون با p24-GLRaV-2 و سازه‌های GFLV.

Figure 4- The evaluation of the fluorescence level in the treated 16c plants with pTRV and subsequently GFLV genes. The same letters within a graph represent no significant difference in fluorescence ($P < 0.05$). a) 3 days post Agroinfiltration with GLRaV-2 -p24 and GFIV constructs. b) 4 days post Agroinfiltration with GLRaV-2 -p24 and GFIV constructs.

از آنجا که ژنهای $(1E)^{Pol}$ و $(2B)^{MP}$ برخلاف p24 نتوانستند افزایش قابل ملاحظه‌ای در سطح فلورسنت در گیاهان تراریخت 16c که ژن GFP در آن‌ها خاموش شده بود، ایجاد کنند و عملکرد آن‌ها مشابه گیاهانی بود که به عنوان شاهد منفی در این تحقیق استفاده شدند، می‌توان گفت که ژن مهارکننده خاموشی در ویروس برگ بادبزنی مو هنوز ناشناخته بوده و مطالعات و آزمایشات بیشتری جهت تعیین ناحیه‌ای از ژنوم GFLV با این عملکرد نیاز است. این نتایج با نتایج Vigne و همکاران در سال ۲۰۱۳ مطابقت داشت. Vigne برای شناسایی تعیین‌کننده‌های علایم، کلون‌های عفونی cDNA مربوط به RNA1 و RNA2 نژاد GHu و F13 ویروس GFLV را تهیه و با استفاده از رویکرد ژنتیک معکوس نشان داد که در نژاد GHu، تعیین‌کننده‌های علایم روی RNA1 خصوصاً در ۴۰۸ نوکلئوتید انتهایی ۳' ژن پلیمراز (RdRp) قرار دارند، اما به نظر نمی‌رسد این ژن به عنوان مهارکننده خاموشی عمل کند. آزمایش دیگری با استفاده از رقم وحشی *N. benthamiana* انجام شد، اما پروتئین $(1E)^{Pol}$ در هیچ-کدام از دو نژاد F13 و GHu برخلاف CMV-2b قادر به افزایش بیان GFP نبود. این در حالی بود که پروتئین $(1E)^{Pol}$ در قسمت-های آگرواینفیلتر شده به آسانی توسط آزمون وسترن بلاتینگ ردیابی شد. نتایج این آزمایشات، هیچ‌گونه فعالیت مهارکنندگی

از آنجا که ژنهای $(1E)^{Pol}$ و $(2B)^{MP}$ برخلاف p24 نتوانستند افزایش قابل ملاحظه‌ای در سطح فلورسنت در گیاهان تراریخت 16c که ژن GFP در آن‌ها خاموش شده بود، ایجاد کنند و عملکرد آن‌ها مشابه گیاهانی بود که به عنوان شاهد منفی در این تحقیق استفاده شدند، می‌توان گفت که ژن مهارکننده خاموشی در ویروس برگ بادبزنی مو هنوز ناشناخته بوده و مطالعات و آزمایشات بیشتری جهت تعیین ناحیه‌ای از ژنوم GFLV با این عملکرد نیاز است. این نتایج با نتایج Vigne و همکاران در سال ۲۰۱۳ مطابقت داشت. Vigne برای شناسایی تعیین‌کننده‌های علایم، کلون‌های عفونی cDNA مربوط به RNA1 و RNA2 نژاد

شده توسط سازه سنجاق سری مبتنی بر ژن پروتئین حرکتی غلبه کند که این به معنی مهار سازوکار خاموشی ژن می‌باشد. دلیل شکسته شدن مقاومت این است که سازه القاءکننده بر اساس ژن مهارکننده خاموشی این ویروس ساخته نشده است و در نتیجه پس از مایه‌زنی گیاه تراریخت شده با این سازه، ژن مهارکننده خاموشی ویروس، هدف اصلی RNA های دو رشته‌ای نخواهد بود و در نتیجه مقاومت نیز به طور کامل القاء نخواهد شد. روش به کاربرده شده در این پژوهش جهت تعیین و ارزیابی فعالیت مهارکنندگی خاموشی ژن ها، می‌تواند به عنوان روشی مناسب و قابل اعتماد برای یافتن ژن مهارکننده خاموشی در اعضاء جنس *Nepovirus* و سایر ویروس‌ها به کار گرفته شود.

سپاسگزاری

از آقای دکتر مارک فیوکس به خاطر در اختیار گذاشتن مواد و امکانات مورد نیاز جهت انجام این پژوهش در آزمایشگاه ویروس‌شناسی گیاهی دانشکده کشاورزی دانشگاه کرنل آمریکا (ایستگاه تحقیقاتی کشاورزی در ایالت نیویورک) صمیمانه تشکر و قدردانی می‌شود.

منابع

- Andert-Link P, Laporte C, Valat L, Ritzenthaler C, Demangeat G, Ving E, Laval V, Pfeiffer P, Stussi-Garaud C, Fuchs M. 2004. Grapevine fanleaf virus: still a major threat to the grapevine industry. *Journal of Plant Pathology* 86: 183-195.
- Cazzonelli CI, Velten J. 2006. An in vivo, luciferase-based, Agrobacterium-infiltration assay system: implications for post-transcriptional gene silencing. *Planta*, 224: 582-597.
- Chakrabarty R, Banerjee R, Chung SM, Farman M, Citovsky V, Hogenhout SA, Tzfira T, Goodin M. 2007. PSITE vectors for stable integration or transient expression of autofluorescent protein fusions in plants: probing *Nicotiana benthamiana*-virus interactions. *Mol. Plant Microbe Interact.* 20: 740-750.
- Chiba M, Reed JC, Prokhnovsky AI, Chapman EJ, Mawassi M, Koonin EV, Carrington JC, Dolja VV. 2006. Diverse suppressors of RNA silencing enhance agroinfection by a viral replicon. *Virology* 346: 7-14.
- Chisholm J, Zhang G, Wang A, Sanfacon H. 2007. Peripheral association of a polyprotein precursor form of the RNA-dependent RNA polymerase of Tomato ringspot virus with the membrane-bound viral replication complex. *Virology* 368: 133-144.
- Culver JN, Padmanabhan MS. 2007. Virus-induced disease: altering host physiology one interaction at a time. *Annu Rev Phytopathol* 45: 221-243.
- Fan Q, Niroula M, Feldstein PA, Bruening G. 2011. Participation of the Cowpea mosaic virus protease in eliciting extreme resistance. *Virology* 417: 71-78.
- Fischer R, Vaquero-Martin C, Sack M, Drossard J, Emans N, Commandeur U. 1999. Towards molecular farming in the future: transient protein expression in plants. *Biotechnology and applied biochemistry*, 30: 113-116.
- Gaire F, Schmitt C, Stussi-Garaud C, Pinck L, Ritzenthaler C. 1999. Protein 2A of Grapevine fanleaf nepovirus is implicated in RNA2 replication and colocalizes to the replication site. *Virology* 264: 25-36.
- Goodin MM, Dietzgen RG, Schichnes D, Ruzin S, Jackson AO. 2002. pgd vectors: versatile tools for the expression of green and red fluorescent protein fusions in agroinfiltrated plant leaves. *Plant J.* 31: 375-383.
- Gu H, Ghabrial SA. 2005. The Bean pod mottle virus proteinase cofactor and putative helicase are symptom severity determinants. *Virology* 333: 271-283.
- Heaton LA, Lee TC, Wei N, Morris TJ. 1991. Point mutations in the turnip crinkle virus capsid protein affect the symptoms

- expressed by *Nicotiana benthamiana*. *Virology* 183: 143–150.
- Jardak-Jamoussi R, Winterhagen P, Bouamama B, Dubois C, Mliki A, Wetzler T, Ghorbel A, Reustle G. 2009.** Development and evaluation of a GFLV inverted repeat construct for genetic transformation of grapevine. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture* 97: 187–196.
- Jovel J, Walker M, Sanfacon H. 2007.** Recovery of *Nicotiana benthamiana* plants from a necrotic response induced by a nepovirus associated with RNA silencing but not with reduced virus titer. *Journal of Virology* 81: 12285–12297.
- Jupin I, Guilley H, Richards KE, Jonard G. 1992.** Two proteins encoded by beet necrotic yellow vein virus RNA 3 influence symptom phenotype on leaves. *EMBO J* 11: 479–488.
- Kagiwada S, Yamaji Y, Komatsu K, Takahashi S, Mori T, Hirata H, Suzuki M, Ugaki M, Namba S. 2005.** A single amino acid residue of RNA-dependent RNA polymerase in the Potato virus X genome determines the symptoms in *Nicotiana* plants. *Virus Res* 110: 177–182.
- Kapila J, derycke R, vanmontagu M, Angenon G. 1997.** An *Agrobacterium*- mediated transient gene expression system for intact leaves. *Plant Sci.* 122: 101–108.
- Larsen JS, Curtis WR. 2012.** RNA viral vectors for improved *Agrobacterium*- mediated transient expression of heterologous proteins in *Nicotiana benthamiana* cell suspensions and hairy roots. *BMC Biotechnology* 12: 21–21.
- Letunic I, Doerks T, Bork P. 2012.** SMART 7: recent updates to the protein domain annotation resource. *Nucleic Acids Res* 40 (Database issue): 302–305.
- Lewsey M, Surette M, Robertson FC, Ziebell, H, Choi SH, Ryu KH, Canto T, Palukaitis P, Payne T. 2009.** The role of the Cucumber mosaic virus 2b protein in viral movement and symptom induction. *Mol Plant Microbe Interact* 22: 642–654.
- Ma P, Liu J, He H, Yang M, Li M, Zhu X, Wang X. 2008.** A viral suppressor P1/HC-Pro increases the GFP Gene expression in *Agrobacterium*- mediated transient assay. *Appl. Biochem. Biotechnology* 158: 243–252.
- Martelli GP. 2014.** Directory of virus and virus-like diseases of the grapevine and their agents. *Journal of Plant Pathology* 96 (1S): 1-4.
- Mokrzycki-Issartel N, Bouchon B, Farrer S, Berland P, Laparra H, Madelmont JC, Theisen M. 2003.** A transient tobacco expression system coupled to MALDITOF- MS allows validation of the impact of differential targeting on structure and activity of a recombinant therapeutic glycoprotein produced in plants. *FEBS Lett* 552: 170–176.
- Naraghi-Arani P, Duabert S, Rowhani A. 2001.** Quasispecies nature of the genome of Grapevine fanleaf virus. *Journal of General Virology* 82: 1791- 1795.
- Pinck L, Fuchs M, Pinck M, Ravelonandro M, Walter B. 1988.** A satellite RNA in Grapevine fanleaf virus strain F13. *Journal of General Virology* 69: 233–239.
- Ratcliff F, Martin-Hernandez AM, Baulcombe DC. 2001.** Technical Advance. Tobacco rattle virus as a vector for analysis of gene function by silencing. *Plant J* 25: 237–245.
- Ritzenthaler C, Pink M, Pink L. 1995.** Grapevine fanleaf nepovirus P38 putative movement protein is not transiently expressed and is a stable final maturation product in vivo. *Journal of General Virology* 76: 907-15.
- Sanfaçon H, Wellink J, Le Gall O, Karasev A, Vlugt van der R, Wetzler T. 2009.** Secoviridae: a proposed family of plant viruses within the order Picornavirales that combines the families Sequiviridae and Comoviridae, the unassigned genera Cheravirus and Sadwavirus, and the proposed genus Torradovirus. *Archives of Virology* 154: 899-907.
- Serghini MA, Fuchs M, Pinck M, Reinbolt J, Walter B, Pinck L. 1990.** RNA2 of Grapevine fanleaf virus: sequence analysis and coat protein cistron location. *Journal of General Virology* 71: 1433–1441.
- Shiboleth YM, Haronsky E, Leibman D, Arazi T, Wassenegger M, Whitham S. A, Gaba V. Gal-On A. 2007.** The conserved FRNK box in HC-Pro, a plant viral suppressor of gene silencing, is required for small RNA binding and mediates symptom development. *Journal of General Virology* 81: 13135–13148.
- Vaghchhipawala Z, Rojas CM, Senthil-Kumar M, Mysore KS. 2010.** Agroinoculation and agroinfiltration: Simple tools for complex gene function analyses. *Methods in Molecular Biology*. A. Pereira, ed. Humana Press, Totowa, NJ. 65-76.
- Vigne E, Gottula J, Schmitt-Keichinger C, Komar V, Ackerer L, Belval L, Rakotomalala L, Lemaire O, Ritzenthaler C, Fuchs M. 2013.** A strain specific segment of the RNA-dependent RNA polymerase of Grapevine fanleaf virus determines symptoms in *Nicotiana* species. *Journal of General Virology* 94: 2803–2813.
- Viry M, Serghini MA, Hans F, Ritzenthaler C, Pinck M, Pinck L. 1993.** Biologically active transcripts from cloned cDNA of genomic grapevine nepovirus RNAs. *Journal of General Virology* 74: 169-174.
- Voinnet O, Rivas S, Mestre P, Baulcombe D. 2003.** An enhanced transient expression system in plants based on suppression of gene silencing by the p19 protein of tomato bushy stunt virus. *Plant Journal*. 33: 949-956.
- Voinnet O. 2005.** Induction and suppression of RNA silencing: insights from viral infections. *Nat Rev Genet* 6: 206–220.
- Wingard SA. 1928.** Hosts and symptoms of ring spot, a virus disease of plants. *J Agric Res* 37, 127–153.
- Yang Y. N, Li R. G, Qi M. 2000.** In vivo analysis of plant promoters and transcription factors by agroinfiltration of tobacco leaves. *Plant Journal* 22: 543–551.

A method for Evaluation of RNA Silencing Suppression Activity in Plants Using two Proteins of *Grapevine Fanleaf Virus*

Pakbaz S.¹, Pazhouhandeh M.*² and Eini Gandomani O.³

1. PhD student of Plant Virology, Plant Protection Dept., Agriculture Fac., University of Tabriz.

2. Associate Prof. Biotechnology Dept. Agriculture Fac., Azarbaijan Shahid Madani University.

3. Assistant Prof., Plant Protection Dept., Agriculture Fac., University of Zanjan. Iran

* Corresponding Author, Email: pazhouhandeh@gmail.com

ABSTRACT

Suppressor proteins of RNA Silencing have been well described in most genera of plant viruses. The methodology for identifying gene silencing suppressor activity of a protein in a plant system has proven to be an important tool. *Grapevine fanleaf virus* (GFLV) is one of the most common viral diseases in grapevines worldwide and can cause up to 80% crop losses. GFLV is a bipartite member of the *Nepovirus* subgroup A in the family *Secoviridae* and has a single-stranded positive-sense RNA genome. A viral suppressor of RNA silencing (VSR) in Nepoviruses has not yet been described and our knowledge of symptom determinant genes in nepoviruses is very limited. In this study, a transgenic GFP gene was silenced in transgenic *Nicotiana benthamiana* line 16c, and then the ability of GFLV polymerase and movement proteins to suppress gene silencing was evaluated. The efficiency of these two proteins was compared with positive and negative controls. The results showed that neither protein had the ability to suppress gene silencing. However, these proteins are involved in symptom production and systemic infection. This study demonstrates a model method for evaluation of suppressor activity of RNA Silencing.

Key Words

GFLV, RNA Silencing, Suppressor of Gene Silencing